

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO Y MONITOREADO PARA LA
ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DEL
CAFÉ PARA PEQUEÑOS CAFICULTORES DE COLOMBIA

Investigador:
JOSE ALEJANDRO CARDONA BUITRAGO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ DC.

2024

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO Y MONITOREADO PARA LA
ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DEL
CAFÉ PARA PEQUEÑOS CAFICULTORES DE COLOMBIA

Investigador:
JOSE ALEJANDRO CARDONA BUITRAGO

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR
EL TÍTULO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Directores del proyecto:
ANDREA KATERINE PINEDA TORRES
JAVIER DARIO HOYOS LEYVA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ DC.

2024

RESUMEN

El café es uno de los productos de mayor producción y comercialización en diferentes partes del mundo y una de las bebidas con mayor consumo en cada variedad, por sus cualidades y propiedades. En tal sentido, dada la importancia que tiene la producción de un café de alta calidad, se propone a través de la presente monografía, el diseño de un sistema que permita estandarizar el proceso de fermentación anaeróbica mediante automatización y monitoreo de las variables de temperatura, humedad y ph, del grano de café para pequeños caficultores de Colombia.

El proyecto se desarrollará en cinco fases:

1. **Búsqueda de la información:** Se recopilará información relevante de diversas fuentes.
2. **Organización de la información:** La información recopilada se organizará de manera sistemática.
3. **Análisis de la información:** Se analizarán los datos recopilados para obtener perspectivas útiles para la realización del diseño y sistema del proyecto.
4. **Ingeniería aplicada:** Se aplicarán los conocimientos de ingeniería para desarrollar el sistema, utilizando softwares como Proteus y SolidWorks
5. **Validación:** Se realizarán pruebas para validar el funcionamiento del sistema.

El proyecto puede tener un impacto significativo en la industria del café en Colombia y en todo el mundo porque permite vincular nuevas tecnologías en la fermentación del café para potenciar el nivel de calidad del grano.

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2. JUSTIFICACIÓN	5
3. OBJETIVOS	9
3.1. OBJETIVO GENERAL	9
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4. MARCO REFERENCIAL	10
4.1. ESTADO DEL ARTE	10
4.2. MARCO HISTÓRICO	12
4.3. MARCO TEÓRICO	14
4.3.1. GENERALIDADES DEL CAFÉ	14
4.3.2. DISEÑO MECATRÓNICO	25
4.3.2.1. DISEÑO MECÁNICO	26
4.3.2.2. DISEÑO ELECTRÓNICO	33
4.3.2.3. DISEÑO COMPUTACIONAL	43
4.4. MARCO CONCEPTUAL	50
4.5. MARCO LEGAL	54
5. DISEÑO METODOLÓGICO	56
5.1. TIPO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	56
5.2. ETAPAS DE LA METODOLOGIA DEL PROYECTO	56
5.3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	61
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
7. RECURSOS	110
8. CONCLUSIONES	112
9. RECOMENDACIONES	115
10. BIBLIOGRAFÍA	116
11. ANEXOS	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. ficha técnica de las propiedades del grano de café.....	14
Tabla 2. Escala para la calificación y descripción de la calidad de la bebida de café.....	19
Tabla 3. Control y buenas prácticas de fermentación.....	21
Tabla 4. Ventajas y desventajas de diferentes biorreactores.....	24
Tabla 5. Industrias manufactureras.....	31
Tabla 6. Normatividad del café.....	54
Tabla 7. Búsqueda empleada para el caso de investigación.....	62
Tabla 8. Información recopilada de diferentes fuentes.....	64
Tabla 9. Criterios claves de biorreactores.....	66
Tabla 10. Variables fisicoquímicas.....	68
Tabla 11. Componentes del circuito del fermentador.....	71
Tabla 12. Prueba y error.....	94
Tabla 13. Variables Operativas en Pruebas de Error.....	103
Tabla 14. Presupuesto.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Línea de tiempo.	12
Figura 2. Estados de maduración del fruto de café.....	17
Figura 3. Calidad del café a diferentes temperaturas y tiempos.	19
Figura 4. Calidad del café a temperatura de 15°C y diferentes tiempos.	20
Figura 5. Elementos básicos del sistema mecatrónica.	25
Figura 6. Diseño mecatrónico.	26
Figura 7. Diseño mecánico.	26
Figura 8. Materiales.	28
Figura 9. Procesos de manufactura	32
Figura 10. Sensor de temperatura PT100.....	35
Figura 11. Módulo Sensor temperatura MAX31865.....	36
Figura 12. Sensor pH meter SEN0161.....	37
Figura 13. Conexiones entre Arduino y el Sensor de pH SEN0161	37
Figura 14. sensor de humedad DHT11	38
Figura 15. Motor DC.....	40
Figura 16. Arduino.....	41
Figura 17. Lenguaje C.....	42
Figura 18. Partes de la interfaz de Arduino.....	43
Figura 19. Herramientas tecnológicas.....	44
Figura 20. Usos del dibujo asistido por computadora	45
Figura 21. SolidWorks.....	46
Figura 22. Ingeniería Asistida por Computador.....	47
Figura 23. Circuitos electrónicos.....	48
Figura 24. bastidor del robot batalla.....	49
Figura 25. Fases del proyecto.Fuente. Propia del autor	57
Figura 26. Número de documentos consultados.....	63
Figura 27. Organización de la información.....	64
Figura 28. Sensor PT100	72
Figura 29. Sensor SEN0161	73
Figura 30. Sensor DHT11	74
Figura 31. Arduino uno.....	75
Figura 32. Sistema de refrigeración y alarma.....	76
Figura 33. Pantalla LCD.....	77
Figura 34. Virtual terminal.....	78
Figura 35. Circuito Fermentador	80
Figura 36. componentes y conexiones de la tarjeta	81

Figura 37. Tarjeta fermentadora de café.....	82
Figura 38. Diseño de la tarjeta electrónica.....	84
Figura 39. Propuesta del fermentador.....	86
Figura 40. Renderizado del fermentador.....	87
Figura 41. Fragmento del código	89
Figura 42. Código QR del código de programación	90
Figura 43. Código QR del video del fermentador.....	91
Figura 44. Prueba #1	96
Figura 45. Código QR Prueba #1.....	96
Figura 46. Prueba #2	97
Figura 47. Código QR Prueba #2.....	98
Figura 48. Prueba #3	99
Figura 49. Código QR Prueba #3.....	99
Figura 50. Prueba #4	100
Figura 51. Código QR Prueba #4.....	101
Figura 52. Prueba #5	102
Figura 53. Código QR Prueba #5.....	102
Figura 54. Temperatura interna y ambiente	105
Figura 55. Ph.....	106
Figura 56. Humedad	107
Figura 57. Análisis de Errores Operativos Fuente. Propia del autor	108

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. <i>Revisión documental</i>	123
Anexo B. <i>Ficha técnica de los biorreactores</i>	124
Anexo C. <i>Artículo de mecatrónica</i>	125
Anexo D. <i>Tipos de sensores</i>	126
Anexo E. <i>Tipos de Actuadores</i>	127
Anexo F. <i>Materiales y Datos Importantes</i>	128

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia ocupa el tercer lugar en exportación de café, donde más de 560.000 familias cafeteras se benefician de esto (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015), el diario portafolio (Portafolio, 2023) expone como las exportaciones han bajado en un 17% para junio de 2023. Se considera necesario revisar cuáles son las falencias o actividades que están generando la caída de las exportaciones de café hacia el resto del mundo, llegando a la conclusión de que por una parte se trata del problema económico mundial que dejó la pandemia vivida por el COVID-19, y por otra, la falta de tecnificación por parte de algunos campesinos de las diferentes regiones cafeteras del país lo cual hace que los procesos de fermentación del café no sea el de más alta calidad.

En Colombia se han llevado a cabo investigaciones para identificar qué métodos de producción de café afectan su calidad y composición química. Algunas de las causas que ocasionan estos problemas son: el tipo de especie, madurez, beneficio, fermentación, secado y almacenamiento. Si no se maneja un correcto proceso de fermentación del grano de café se puede cambiar la composición y estructura del mucílago. Los tres procesos tradicionales del café son: Lavado, Natural, Honey. (Arenas et al., 2022)

En tal sentido, (Deschamps Solórzano et al., 2008), citado por (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015), menciona la importancia del cumplimiento de las condiciones ideales del suelo es fundamental para la producción de café, lo que requiere mantener actividades de salubridad desde la verificación de la calidad del terreno hasta el control de los frutos durante su producción y recolección. Se recomienda cosechar más del 80% de frutos maduros, almacenarlos en costales o recipientes con agua limpia (1,6 L/kg de cereza) y realizar una clasificación detallada para descartar flotes y frutos dañados. Posteriormente, se deben despulpar los granos en una despulpadora sin agua y pasar los granos en baba por doble tipo de zaranda.

En el mismo sentido, es indispensable hablar de la fermentación del café como elemento fundamental para hacer del mismo una variedad de café especial. En la fermentación conviene medir el pH y los grados Brix del mucílago del café al inicio y final del proceso considerando el control del tiempo y temperatura para transformar las características, intensidades y frecuencias de los sabores, compuestos químicos y la volatilidad presente en el café.

En la fermentación puede realizarse de dos maneras: fermentación sólida abierta en la cual es importante cumplir con el tiempo de 14 y 18 h a temperatura de 20 a 23°C y de 14 a 24 h para 13 a 17°C y fermentación sumergida a temperaturas entre 20 y 23°C fijar un tiempo entre 18 y 30 h y para temperaturas de 13 a 17°C se puede fermentar hasta 42 h para obtener un café de alta calidad. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

Es fundamental establecer el tiempo de fermentación del café para evitar problemas como la sobre fermentación, que puede afectar sus propiedades sensoriales, como el olor y el sabor. El tiempo promedio recomendado es de 16.4 horas, aunque puede variar según las condiciones fisicoquímicas del ambiente y del fruto del café (Córdoba Castro y Guerrero Fajardo, 2016). Además, es crucial controlar el tiempo, la temperatura, la variedad de fruto y las condiciones de higiene, ya que cualquier variación puede dar lugar a sabores y aromas agradables, como dulces, cítricos y frutales, o a defectos indeseables, como vinagre, sabores agrios, podridos y terrosos. Un manejo inadecuado en las etapas de lavado, fermentación y secado puede comprometer la calidad del café (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015).

Considerando lo anterior, en palabras de (Plazas Pemberthy, L. 2022): En muchos casos el caficultor no está pendiente de las alteraciones que suceden durante o al finalizar del proceso de fermentación, pudiendo con esto generar resultados no deseados en el fruto del café, convirtiendo al fruto en uno no estandarizado, el cual no genera los mismos beneficios que un café especial de alta calidad, reduciendo la competencia de los productores por esa razón es importante manejar el proceso de fermentación controlada con información fidedigna de las variables que se alteran por este proceso para que los caficultores puedan tomar decisiones informadas en cuanto a continuar o suspender el proceso.

Es de tener en cuenta que la calificación del café se hace por medio de la SCA (Specialty Coffee Association o Asociación de Cafés Especiales) en un formato estandarizado con una puntuación de 100 puntos. Si el café es menor de 69,9 se considera de mala calidad o defectuoso, entre 70 a 79,9 se considera de calidad comercial, mayor a 80 se considera un café de especialidad y por encima de 90 puntos es un café superior. En esta valoración se están midiendo 10 parámetros los cuales son Aroma o Fragancia, Sabor, Sabor Residual, Acidez, Cuerpo, Uniformidad, Balance, Taza Limpia, Dulzor y Puntaje Catador. Cada parámetro se mide de 0 a 10 para un total de 100 puntos dando como resultado la calidad del café. (Plazas Pemberthy, L. 2022) La fermentación ideal para la obtención de café

con calidad especial y superior es a temperatura de 15°C con respecto a la calidad obtenida en fermentación a temperatura ambiente de 18 a 26°C. en fermentaciones a temperaturas altas, en sistemas cerrados, sólidos y tiempos de más de 42 horas presentan frecuentemente problemas o malos sabores y olores. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

Se debe tener claro el tiempo que se empleará para fermentar el fruto del café para diferenciar la calidad, sabor, olor, características y darle valor agregado al producto terminado del café. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015). Por ejemplo, en Nariño los pequeños caficultores manejan un proceso tradicional inconsistente para determinar el tiempo completo necesario para el proceso de fermentación, consiste en el tacto/sensación y el sonido de los granos. Si se sobre fermenta o se presenta algún problema no se puede analizar la causa hasta el producto final cuando se generan malos olores, sabores o defectos en el fruto. (Córdoba Castro y Guerrero Fajardo, 2016)

Según lo anterior, es necesario estandarizar el proceso de fermentación del café, por su complejidad, ya que los pequeños caficultores se encontrarían afectados por estos factores: primero, se necesita una inversión alta de presupuesto. Segundo, el proceso requiere monitorear constantemente los parámetros fisicoquímicos que pueden llegar a ser complejos y costosos. Tercero, los caficultores utilizan sus conocimientos para determinar el punto ideal de fermentación por observación o por el tacto lo que ocasiona diferentes problemas. (Plazas Pemberthy, L. 2022)

Los sistemas de automatización y monitoreo de los procesos de beneficio del café como temperatura, ph, fermentación, conductividad eléctrica, concentración de gases de alcohol, pH y CO₂, los cuales ya son parte del mercado, aunque son muy costosos, algunos son muy básicos, generan complejidad en la implementación y las diferentes condiciones de operación lo cual ha ocasionado que pequeños y medianos caficultores se vean limitados para producir un excelente producto final de la bebida de café.

Según diferentes estudios (Chou et al., 2019) la implementación de tecnologías de inspección con aprendizaje profundo para la selección de granos de café es importante en la evolución de la agricultura de precisión. Esta metodología no solo incrementa la exactitud en la clasificación de granos, sino que también optimiza los tiempos de trabajo industriales al minimizar la intervención manual. Además, la técnica de enriquecimiento automático de datos etiquetados fortalece los modelos de aprendizaje profundo, brindando al sistema una mayor capacidad de adaptación

a diversas variedades de granos y sus posibles defectos. Este avance promete elevar la calidad del producto y potenciar la eficacia productiva en el sector cafetero.

Haciendo que la fermentación del café se muestre como un proceso complejo que transforma significativamente la calidad de la bebida con un correcto y meticuloso control del proceso, incluyendo la temperatura, el tiempo y la higiene, dando al café un sabor y aroma excepcional. (Plazas Pemberthy, L. 2022) La adopción de estas prácticas de fermentación controlada, como las recomendadas por la Specialty Coffee Association (SCA), permite que este proyecto ayude a los pequeños agricultores cafeteros a crear perfiles sensoriales distintivos y mejorar la consistencia de la calidad del café.

Aunque el entorno y las condiciones específicas pueden variar, la tendencia hacia la fermentación en ambientes cerrados y controlados refleja un esfuerzo por optimizar estos efectos beneficiosos en el sabor del café. Sin embargo, aún no es posible definir un proceso único capaz de aumentar la calidad del café o desarrollar un patrón sensorial específico en cualquier condición ambiental. (Janne Carvalho Ferreira et al., 2023)

Por el problema que se presenta, hay que crear herramientas tecnológicas que permitan solucionar los procesos de postcosecha del café al proponer un diseño que monitoree y automatice el proceso de fermentación con condiciones estandarizadas. La presente monografía se propone como respuesta al siguiente cuestionamiento:

¿Qué sistemas mecatrónicos pueden mejorar el proceso de fermentación del café de los pequeños caficultores de Colombia?

2. JUSTIFICACIÓN

Para cumplir adecuadamente con las buenas prácticas agrícolas hay que tener claridad y control de los procesos e identificar los riesgos o defectos del grano de café para desarrollar correctamente los estándares de SCA (Hernández Alcantar, P. A. 2021). La normativa debe ir acorde tanto al producto y al proceso como a la cultura, el nivel social, económico y tecnológico del caficultor cumpliendo con las normas legales, ambientales y de salud vigentes en pro del cuidado del café de algún ente contaminante. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

Es así como, para tener un café de calidad superior, es importante aprender y aplicar programas de certificación, ya que generan una excelente ventaja en asegurar los procedimientos de toda la cadena de producción, cuidando la calidad desde el cultivo hasta la taza para que los caficultores vendan su producto con altos estándares a los clientes interesados en encontrar proveedores capaces de ofrecer una calidad constante (Hernández Alcantar, P. A. 2021).

Para lograr este propósito, es vital que todo caficultor realice la fermentación controlada del café para solucionar los problemas de la realización del café artesanal y empiecen a producir café de calidad superior generando beneficios económicos, sociales y ambientales. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

En este momento, los pequeños caficultores están fermentando de manera artesanal y siguiendo sus criterios para identificar si el fruto ya está listo, lo que no garantiza una calidad adecuada del producto final, por eso es importante que cuenten con herramientas y conocimientos para manejar una fermentación adecuada del fruto. (Carbajal-Guerreros et al., 2022)

Es fundamental entender que la fermentación del café puede ocurrir de manera aeróbica o anaeróbica. En la fermentación aeróbica, no se retira ninguna capa del grano, lo que genera olores y sabores afrutados característicos. Por otro lado, en la fermentación anaeróbica, se elimina el mucílago, lo que favorece la actividad de microorganismos específicos que liberan metabolitos beneficiosos. Este proceso mejora los sabores y olores del café, aumentando su acidez y complejidad, lo que resulta en perfiles sensoriales más ricos y atractivos para los consumidores (Juárez González et al., 2021). La fermentación anaeróbica, al controlar el entorno sin oxígeno, también ayuda a reducir el riesgo de sabores indeseables, lo que hace de este método una opción valiosa para los caficultores que buscan calidad superior en su producción.

Es de aclarar que en el proceso de fermentación artesanal se producen diferentes problemas generando microorganismos productores de ácido acético, propiónico y butírico, ácidos grasos de cadena corta lo cual ocasiona malos sabores y olores en la bebida del café. Para solucionar estos problemas se debe implementar el proceso de fermentación controlada para generar café de muy buena calidad y cuidando las características fisicoquímicas importantes en la producción del café.(Neu et al., 2016)

Por los problemas que se les ha presentado a los pequeños caficultores han mejorado su producto generando cafés especiales con características fisicoquímicas mejorando su olor y sabor en la bebida mediante certificaciones como café sostenible, buenas prácticas de agricultura o sistemas de gestión de calidad, abriendo la posibilidad a un mercado potencial que les brinda beneficios económicos, sociales y ambientales. Desde 2011 se reflejó un aumento en los precios del café especial de unos \$20 USD/lb en 2018 y el precio del café tradicional está cayendo, ocasionando una variación económicamente amplia entre ambos. (Hernández Alcantar, P. A. 2021)

Mediante el proceso de fermentación controlada, los pequeños caficultores pueden reducir los defectos del grano y mejorar las cualidades organolépticas de la bebida, lo que resulta en cafés especiales de mayor calidad. Es crucial seleccionar adecuadamente los frutos, asegurando que al menos el 80% esté maduro y en buenas condiciones (Juárez González et al., 2021). Si se maneja correctamente todo el proceso, se podrán obtener sabores y olores uniformes, con perfiles suaves, dulces y agradables para el cliente, logrando una valoración del café superior a 84 puntos (Carbajal-Guerreros et al., 2022).

Si el campesino se capacita y se dedica a producir cafés especiales puede disfrutar de diferentes beneficios económicos, sociales, ambientales, y el ingreso a un mercado agregado que se vuelve producto apetecido por países desarrollados, dispuestos a pagar un precio mayor por disfrutar de una mejor experiencia sensorial. (Hernández Alcantar, P.A. 2021)

La estandarización de los tiempos en el proceso de recolección manual de café es crucial para evaluar el desempeño de los recolectores y determinar el tiempo estándar necesario para completar un ciclo de recolección. En este contexto, se aplican técnicas de ingeniería de métodos para identificar los elementos del

proceso, evaluar el ritmo y estimar los suplementos fijos y variables que influyen en el proceso. (Salazar et al., 2016)

Además, durante la recolección tradicional, se emplean técnicas videográficas para capturar información en el campo. Los tiempos estándar y los factores de desempeño proporcionan información valiosa para el monitoreo, control y toma de decisiones en las fincas cafeteras. En resumen, estas prácticas no solo mejoran la eficiencia en la recolección de café, sino también contribuyen al desarrollo sostenible y a la calidad de vida de los pequeños productores cafeteros. (Salazar et al., 2016)

En el artículo de (El Maidah y Dwi Suhendra, 2023), se estudia el desarrollo de un sistema de clasificación de frutos de café, que forman parte de un sistema de automatización integrado para el procesamiento y almacenamiento del café. El objetivo de la implementación de este sistema es mejorar y mantener la calidad del café a lo largo de los procesos de producción y almacenamiento.

El sistema de automatización integrado para el procesamiento del café comienza con el sistema de clasificación de frutos de café, que se encarga de seleccionar los frutos de café perfectamente maduros y de alta calidad. Después, el sistema continúa con los procesos de producción y almacenamiento de los granos de café con tecnología de software incorporada al sistema de hardware. La tecnología de software empleada es un componente de un sistema de control inteligente, que utiliza la inteligencia artificial como su mecanismo de control subyacente. (El Maidah y Dwi Suhendra, 2023)

Desde la mirada de los caficultores, un sistema automatizado y monitoreado de las cualidades sensoriales durante el proceso de fermentación es una excelente herramienta que conduce a mejoras en la calidad y el carácter distintivo del producto, generando una gran oportunidad para introducirse en los mercados internacionales y no sólo mejorar su calidad de vida, sino también aportar a la economía de la región y del país. (Plazas Pemberthy, L. 2022).

La propuesta de valor se centra en la recopilación automática de datos sobre variables de fermentación, combinada con calificaciones de catadores expertos y protocolos de producción diferenciados. Este sistema de automatización y monitoreo mejorará las condiciones del proceso, reducirá costos y mantendrá la calidad del café. Diseñada para beneficiar a los pequeños caficultores, la solución

es práctica y rentable, ofreciendo una experiencia positiva que aborda sus diversos desafíos.

Desde la aplicación de los conocimientos adquiridos en Ingeniería Mecatrónica el proyecto busca presentar a los caficultores el diseño de un fermentador con sistema de automatización y monitoreo para estandarizar el proceso de fermentación anaeróbico para cafés especiales.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema automatizado para la estandarización del proceso de fermentación anaeróbica de café en medio húmedo, con automatización y monitoreo de temperatura, pH y humedad.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información de los procesos de fermentación usados con café de alta calidad identificando los puntos críticos de operación más usado en Colombia.
- Plantear un sistema mecatrónico que permita la automatización, monitoreo y control de la temperatura, pH y humedad del proceso de fermentación cerrado sumergible del café.
- Evaluar el funcionamiento del sistema por medio de simulación bajo tecnologías CAE (Ingeniería Asistida por Computador).

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ESTADO DEL ARTE

En su etapa inicial, en el Anexo A se presentan investigaciones relacionadas con la investigación, a través de las cuales se han desarrollado sistemas automatizados y monitoreados diversos para fermentar el grano de café.

Un primer análisis, realizado por CENICAFÉ publicado por (ANNET y Naranjo, 2014), en la finca cafetera La Primavera, se analizaron los procesos de fermentación y secado del café cumpliendo con todos los procedimientos legales para su comercialización. En todo el proceso se analizó y controló la temperatura, humedad y el pH comparando los datos obtenidos en campo.

Desde este análisis, el café tuvo un pH inicial neutro en comparación con las muestras evaluadas por CENICAFÉ aumentando su tiempo de fermentación, se analizó la duración del proceso para obtener las características ideales de la temperatura ambiente de 20 °C, el pH de 3,5 y la altura de 1.470 a 1.500 metros sobre el nivel del mar y el contenido de humedad del grano para prevenir algún problema o fallas y cumplir con las condiciones de exportación.

El proyecto de (Galvis P, Dalvia J. 2015) se enfocó en la eliminación del mucílago de los granos de café mediante fermentación en un tanque de doble camisa de 105cm x 77cm con capacidad para 300kg. Utilizando el software LabVIEW para controlar las variables fisicoquímicas, lograron reducir el margen de error y producir cafés especiales. Realizaron pruebas de catación que arrojaron datos desde 85 en adelante. El proyecto es significativo porque permite a los caficultores o usuarios seleccionar los parámetros deseados de las variables fisicoquímicas de los granos de café, simplificando la producción y mejorando la calidad del café.

Según el estudio de (Guevara Zapata 2019), se realizaron cuatro tratamientos en recipientes abiertos, cada uno con tres repeticiones. Las muestras se distribuyeron en 12 fermentadores artesanales, controlando las variables durante la fermentación. Se aplicó un análisis de varianza de dos factores, una prueba de Tukey y un diseño experimental aleatorio. Los tratamientos que fermentaron en menos de 11 horas (F8, F9 y F10) mostraron una concentración de levadura del 1%,

lo que sugiere que esta variable influye significativamente en el proceso de fermentación.

Como establece (Peñuela Martínez et al., 2021) se llevaron a cabo experimentos de laboratorio para investigar y evaluar varios parámetros, incluyendo un rango de temperatura de 22 a 27 °C y un pH de 5,6 a 3,5. Se observaron tasas de degradación del 79 al 85% con enzimas y del 22 al 23% con aguas residuales. Las calificaciones de SCA variaron entre 81,18 y 81,80. Las propiedades fisicoquímicas de las enzimas, que dependen de su concentración, composición y actividad, resultaron en un aumento de la concentración, una disminución de la viscosidad y la acidez. Todo esto se logró sin comprometer la calidad y el tiempo de servicio, independientemente de la aplicación utilizada.

El estudio de (Martínez et al., 2021) se centró en la producción de un biorreactor de acero inoxidable utilizando café estabilizado con peptona de glucosa y agar nutritivo, examinando diversas poblaciones de levaduras y bacterias. Se descubrió que el sabor del café está principalmente influenciado por su aroma, siendo la cantidad de bacterias y compuestos químicos factores cruciales. Además, el aroma y el color mejoran la calidad del café y aumentan su puntuación SCA, con sabores y aromas que presentan características frutales y florales.

El estudio de (Carbajal-Guerreros et al., 2022) se enfocó en el uso de 150 kg de café maduro en un proceso de fermentación controlada. Se desarrolló un prototipo de fermentación inteligente que estandariza los procesos de fermentación para cafés especiales. Las pruebas mostraron que diferentes sabores, aromas y brillos alcanzaron 84 puntos. Al controlar la temperatura, se pueden gestionar procesos bioquímicos cruciales en la producción de café, demostrando que esta variable impacta significativamente en la calidad y características del producto.

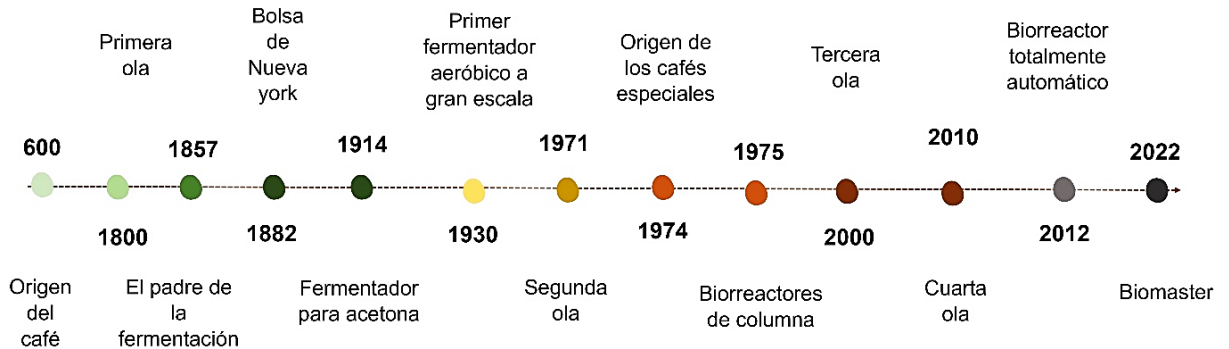
El estudio de (Plazas Pemberthy, L. 2022) se enfocó en los desafíos que enfrentan los pequeños caficultores que cultivan una hectárea por familia, destacando la gestión de la producción de café como un problema clave. Se desarrollaron dos modelos: uno para beneficiaderos y otro para laboratorios de muestras, con el objetivo de mejorar la calidad del café. Estos modelos ayudan a los productores en Colombia a comprender que el uso de métodos de control puede impactar significativamente en la calidad y el rendimiento del café, sugiriendo que la implementación de tecnologías de control puede ser beneficiosa para ellos.

En el Anexo A se pueden observar los artículos analizados de los diferentes procesos y proyectos de los sistemas de fermentación del café para el mejoramiento del café y la obtención de un café de alta calidad.

4.2. MARCO HISTÓRICO

Posteriormente se puede evidenciar la línea del tiempo como referencia a algunos eventos importantes de la fermentación y los biorreactores que se utilizan en el proceso de postcosecha de los granos de café para la obtención de café de buena calidad.

Figura 1 Línea de tiempo.



Fuente: Propia del autor.

En la Figura 1 se muestra una línea del tiempo que ilustra la evolución del café, destacando su importancia cultural, económica y social. Además, resalta las mejoras tecnológicas, especialmente el uso de biorreactores, que han optimizado la fermentación y mejorado la calidad del café. A continuación, se explicarán detalladamente los puntos y fechas de la línea del tiempo, lo que permitirá entender mejor la historia y la innovación en la producción de café.

La historia del café se origina en la leyenda de que los animales ganaban más energía al consumir granos de café. Un monje, al observar esto, decidió preparar la primera taza de café y la compartió con sus discípulos. Esta historia subraya el papel del café no solo como fuente de energía, sino también como un componente esencial de la dieta y la cultura desde tiempos antiguos. (Derara-Megenassa, 2022)

La “primera ola” del café se refiere a una época de consumo rápido de café que benefició a la industria cafetera en términos sociales, económicos y

ambientales. El objetivo principal de esta ola es hacer accesible un café diferente y único para todos. Algunas de las empresas más conocidas de esta primera ola incluyen Folgers, Maxwell House, Mr. and Mrs. McClellan. Café, Nescafé, Hill Bros. Café y Satori Kato. (Reis Guimarães et al., 2016).

Louis Pasteur, padre de la fermentación, realizó diferentes estudios y experimentos analizando el proceso, planteó que mediante las levaduras se genera la fermentación y demostró que la célula de la levadura puede vivir con o sin oxígeno, elemento clave en el sabor y el olor de los alimentos. (Noxtongo et al., 2020)

La creación de la Bolsa de Nueva York tuvo como objetivo controlar y facilitar el funcionamiento del centro de negociación financiero, permitiendo a particulares y empresarios realizar contratos estandarizados para la compra y venta de materias primas e instrumentos financieros a costos justos para ambas partes. Esto contribuyó a establecer un mercado más ordenado y transparente (Figueroa-Hernández et al., 2019).

El diseño, construcción y prueba del fermentador para acetona se dio en el transcurso de la segunda guerra mundial por el científico británico Chain Weizman y años después se pudo comprobar y utilizar este material para la fabricación de bombas.(Manan y Webb, 2017)

En Europa central se crearon fermentadores aeróbicos que eran unos tanques grandes de forma cilíndrica con aire en la base mediante una red de tuberías perforadas. Estos fermentadores aeróbicos fueron creados por Beeze y Leibmann. (Montoya y Bermúdez, 2018)

En la tercera ola del café, el principal objetivo es que las personas se interesen y aprendan sobre las características de calidad del producto, incluyendo los procesos de cultivo y producción, el origen y la marca, que son distintivos de calidad. También se destaca la importancia de la formación y experiencia del barista, la trazabilidad de los granos, los micro tostadores y el café de comercio justo, permitiendo que expertos evalúen adecuadamente las bebidas de café (Reis Guimarães et al., 2016).

La cuarta ola del café se centra en los beneficios de la tecnología y las nuevas herramientas para que muchas personas puedan estudiar y aprender sobre los

diferentes tipos de café, las propiedades, las características fisicoquímicas, los tipos de sabores y olores, las preparaciones y todo relacionado con el proceso de preparación del café y los beneficios de este producto en el área alimenticio y en diferentes áreas industriales. (CCI, 2022).

La creación del biorreactor totalmente automático genera un cambio importante en los procesos y se caracteriza por estar dividido en dos partes, en la primera parte están los componentes ingenieriles donde se encuentran los sensores, las válvulas, el ordenador y las bombas y en la segunda parte se encuentra un cartucho intercambiable el cual brinda excelentes beneficios evitando contaminaciones cruzadas o algún inconveniente ya que la aplicabilidad de estos biorreactores es en la realización de medicamentos.

4.3. MARCO TEÓRICO

4.3.1. GENERALIDADES DEL CAFÉ

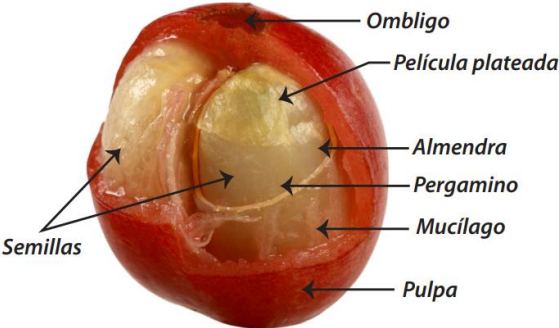
4.3.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CAFÉ

La ficha técnica que se presenta a continuación describe las propiedades del café en grano:

Tabla 1. ficha técnica de las propiedades del grano de café

CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CAFÉ	
	
Fuente: (Trejo-Téllez, 2018)	
Nombre comercial	Grano de café, café pergamino, café oro, café pilado

CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CAFÉ

<p>Características del grano</p>	<p>El grano de café es esferoidal y tiene un diámetro de 15-20 mm, , pertenece a la familia Rubiaceae y al género Coffea. Durante su maduración, cambia de color de verde a rojo y está cubierto por una fina capa roja que representa el 40-65% de su peso fresco y está compuesta por un 70-85% de agua, azúcar y pectina.</p> <p>El grano tiene una humedad del 12% y un olor limpio y fresco. Su color es uniforme y tiene un 0-5% de defectos físicos. El tamaño del grano es mínimo del 30% por encima de la malla 15 o 14 y máximo del 5% por debajo de la malla 13 o 12. La densidad del grano es de 650 gramos por litro y su rendimiento es del 70-75%.</p> <p>El fruto del café es rico en azúcares, reductores, polifenoles, lípidos y cafeína. En su estructura se encuentran dos semillas, endospermo, tegumento, endocarpio, capa de pectina, pulpa y la piel exterior. (Monroig, 2016)</p>
<p>Composición del grano de café</p>	<p>El fruto del café consta de varias partes las cuales son:</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Fuente: (Ramos et al., 2010)</p> <ul style="list-style-type: none"> • La cáscara o pulpa: Es de color rojo o amarillo según su madurez, es jugosa y envuelve las otras partes del fruto. • El mucílago o baba: Es de color cremoso y tiene una textura gelatinosa. • El pergamino o cascarilla: Es de color crema a marrón y envuelve la semilla. • La película plateada: También envuelve la semilla. • La semilla: Se encuentra dentro del fruto y se divide en dos. • La almendra: Se encuentra en la parte convexa de la semilla. • El ombigo: Es la piel exterior del fruto. Estas partes juntas forman la estructura completa del grano de café.
<p>Características del proceso productivo</p>	<p>El proceso productivo se inicia con la elección de la variedad del café, exigencia del suelo apropiado, siembra del cultivo, sombreado del café, fertilización orgánica del café, podas y cuidados, cosecha, procesos de post cosecha; como el despulpado, fermentado, lavado y clasificado, secado, café pergamino, café pilado o café oro o grano verde.</p>

Fuente: Elaboración propia

La calidad del café colombiano proviene de variedades de la especie arábica, combinadas con las condiciones ambientales óptimas de suelo y clima. La geografía y localización de Colombia, junto con la recolección de frutos maduros y el procesamiento por vía húmeda, son factores clave en la obtención de un café de alta calidad.

Para garantizar una buena calidad de café, a partir de las condiciones mencionadas, es importante manejar correctos controles y buenas prácticas para el desarrollo de las fermentaciones controladas del café, con base en las recomendaciones de Cenicafé garantizando la mejor materia prima posible (Peñuela M., Aída E.; Sanz U., Juan R. 2019).

4.3.1.2. ESTANDARIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL CAFÉ

El café es una de las bebidas no alcohólicas más consumidas y su consumo se está extendiendo a nivel mundial. Es la segunda materia prima más importante intercambiada en los mercados mundiales, después del petróleo crudo. Brasil es el principal productor y exportador de *Coffea arábica* (Agnolletti et al., 2022) seguido de Indonesia, Etiopía, Filipinas, México, Vietnam y otros 40 países.

En tal sentido, la gente bebe café para relajarse y disfrutar de sus diversos sabores y aromas. Tiene efectos fisiológicos y psicológicos más allá de sus beneficios nutricionales. En los últimos años, la apreciación por el café de calidad ha dado importancia a los cafés especiales, que tienen aromas únicos y sabores extraordinarios. Estas características están ligadas a las zonas donde se cultivan los cafés y sus genotipos cultivados (Ansari, et al, 2021).

Actualmente se cree que los diferentes métodos de procesamiento inducen diferentes reacciones metabólicas en los frutos del café, lo que puede afectar la composición química de los granos de café y, por lo tanto, su calidad de cata. (Barré et al, 2022).

Figura 2. Estados de maduración del fruto de café.



Fuente. (Peñuela-Martínez et al., 2022)

La Figura No. 2 muestra los diferentes estados de maduración del grano de café, desde los granos inmaduros de color verde hasta los granos sobre madurados de color oscuro. Para una recolección óptima, se recomienda que más del 80% de los frutos estén maduros. Posteriormente, se debe clasificar la cereza con agua limpia no recirculada y descartar los flotantes y frutos dañados.

El grano de café debe recolectarse cuando esté maduro para procesarlo y pasar a la fase de fermentación. Esta fermentación puede ser aeróbica o anaeróbica, siendo la última la más utilizada porque se realiza en ausencia total de aire, sin oxígeno. Este proceso implica una reacción química entre una combinación de levaduras, bacterias y microorganismos, lo que genera un proceso de descomposición que resulta en aromas y sabores exóticos en el café. (Muñoz, D. 2023)

4.3.1.3. FERMENTACIÓN DEL CAFÉ

La fermentación es un proceso metabólico que consume azúcares en presencia (aeróbica) o ausencia (anaeróbica) de oxígeno, y es fundamental para eliminar el mucílago del café, que contiene polisacáridos como pectina, celulosa y almidón. Este mucílago puede prolongar el tiempo de secado de los granos e, incluso, causar moho, lo que afecta negativamente la calidad del café. Las enzimas presentes en el fruto del café y la microflora ambiental facilitan ambos tipos de fermentación.

El sistema anaeróbico se utiliza para optimizar la calidad del café al eliminar el mucílago antes de la fermentación. En este proceso, los granos se sumergen en un entorno sin oxígeno, lo que favorece la actividad de microorganismos específicos

que producen metabolitos deseables. Esto no solo reduce el riesgo de defectos por moho, sino que también potencia la complejidad y acidez del café, mejorando su perfil de sabor. Este enfoque ha ganado popularidad entre los productores que buscan destacar la calidad de su café y ofrecer sabores únicos en el mercado.

Durante este proceso los microorganismos (levadura, bacterias y hongos) desempeñan un papel importante en la degradación del mucílago al producir varias enzimas, alcoholes y ácidos durante el proceso de fermentación. Hay varias enzimas disponibles comercialmente para la fermentación del café (R. F. Schwan and G. H. Fleet, 2014).

Las investigaciones actuales indican que la fermentación del café se está volviendo más popular para producir café de especialidad. (Vaast et al. 2006) informaron de varios cambios fisiológicos en los granos durante la fermentación, como disminución del agua y azúcares simples y desarrollo de precursores de aroma y sabor.

El propósito de esta revisión es explicar la importancia de un proceso controlado de fermentación del café para asegurar su excelente calidad. A través del análisis de investigaciones recientes, se examina el impacto de la fermentación en los atributos de calidad del café. Esta revisión proporciona una comprensión clara del papel de los microorganismos en la fermentación del café y puede guiar futuras investigaciones sobre la comercialización de cultivos iniciadores potenciales.

Según (Peñuela-Martínez et al., 2023) la fermentación controlada de café a 15°C en biorreactores resulta en un café de mejor calidad en comparación con la fermentación natural a 30°C. Este proceso se realiza en cinco fincas distintas y es una herramienta efectiva para mejorar la calidad del café. La fermentación a esta temperatura también afecta la forma de la taza de café producida.

En palabras de (Delgado, 2021), los caficultores deben comprender y familiarizar las operaciones en la fermentación que les permitan tomar buenas decisiones objetivas. Porque, si la fermentación es incorrecta, podría significar un problema. Pero, si se tiene un control cuidadoso de la misma, puede producir bebidas deliciosas de alta calidad atraen a los clientes.

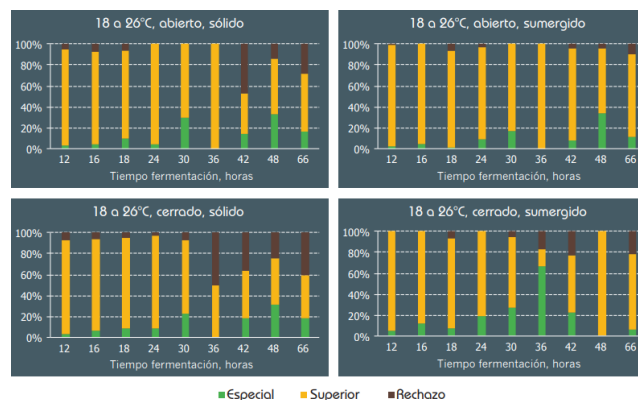
Tabla 2. Escala para la calificación y descripción de la calidad de la bebida de café.

Calidad especial y superior			Calidad media			Rechazo		
9	8	7	6	5	4	3	2	1
Lo mejor	Muy bueno	Bueno	Tolerable	Media	Bajo	Rechazo	Rechazo	Rechazo
Tostado, avellanada, frutal, dulce, almendra, cítrico, malta, moras, caramelo, vino, clavos, vainilla, herbal			Fique	Verde, astringente, banano, césped	Acidez baja	Maíz, pronunciado, amargo, madera, cereal, quemado	Fermento, flores, pulpa, sucio, plátano, grasa, áspero, cebolla, húmedo, agrio, coco	Vinagre, picante, tierra, ahumado, cuero, moho, podrido, hediendo, fenol.

Fuente. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

La tabla 2 presenta una escala de 9 puntos que evalúa la calidad del café según sus aromas y sabores, donde una puntuación alta refleja un proceso de fermentación cuidadoso, mientras que puntuaciones bajas indican sabores indeseables. Es crucial que los caficultores mantengan calificaciones altas en sus productos. La aplicación de un proceso de catalización a 15°C mejora la variedad de sabores y olores, elevando la calidad del café especial y reduciendo defectos como sabores agrios que pueden surgir tras más de 42 horas de fermentación a temperatura ambiente. Esto resalta la importancia de emplear técnicas adecuadas en la producción de cafés especiales, promoviendo su valorización en el mercado (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015).

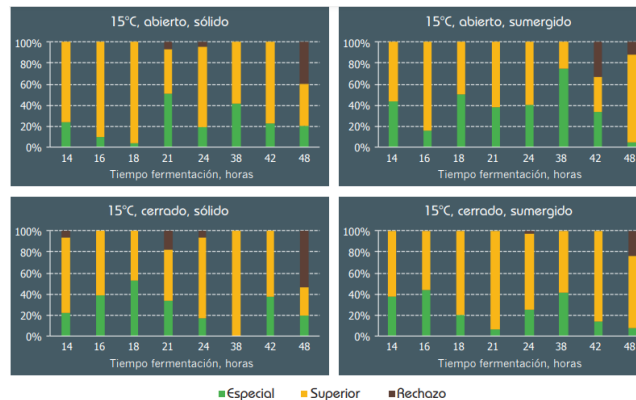
Figura 3. Calidad del café a diferentes temperaturas y tiempos.



Fuente: (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

Según la Figura No. 3, para temperaturas entre 18 a 26°C, se recomienda un tiempo de fermentación de 18 a 30 horas para obtener café de tipo especial y superior de la mejor calidad. En otros intervalos de tiempo, la calidad del café no cumple con las expectativas.

Figura 4. Calidad del café a temperatura de 15°C y diferentes tiempos.



Fuente: (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

En la Figura No. 4 se muestran las pruebas de laboratorio realizadas a una temperatura constante de 15°C. Aunque el tiempo de fermentación puede variar dependiendo del método utilizado para producir café especial y superior, el intervalo más recomendado es de 18 a 38 horas.

Para un proceso de fermentación controlada exitoso, es crucial manejar adecuadamente las variables y seguir buenas prácticas para su aplicación. Las variables claves a considerar pueden incluir:

- **Temperatura:** La temperatura afecta la velocidad y eficacia de la fermentación del café, siendo 15°C la óptima para mejorar su calidad y evitar defectos. Esto resalta la importancia de aplicar técnicas adecuadas en la producción de cafés especiales.
- **Tiempo:** El tiempo de fermentación puede variar dependiendo del método y la temperatura. Un rango de 18 a 38 horas se ha sugerido como óptimo.
- **Método de fermentación:** El método de fermentación, ya sea aeróbico o anaeróbico, influye en la calidad del café. Mientras la fermentación aeróbica puede generar sabores afrutados, la anaeróbica permite un mejor control del proceso, realzando sabores y aromas. Elegir el sistema adecuado es crucial para obtener cafés especiales valorados en el mercado.

- **Calidad del grano de café:** La calidad inicial del grano de café puede afectar el resultado final de la fermentación.
- **Condiciones de limpieza:** Mantener un ambiente limpio puede ayudar a prevenir la contaminación y asegurar una fermentación efectiva.

El control adecuado de las variables en la fermentación del café es esencial para lograr un proceso de fermentación controlada y de alta calidad. En particular, el sistema anaeróbico, que se caracteriza por la ausencia de oxígeno, proporciona un ambiente estable que puede favorecer el desarrollo de perfiles de sabor más complejos y agradables. Al evitar la exposición al oxígeno, se minimizan las reacciones indeseadas que pueden generar defectos en el sabor. Esto permite que los metabolitos generados durante la fermentación se concentren, resultando en cafés con notas más intensas y refinadas.

Es fundamental reconocer que cada lote de café es único y puede requerir ajustes específicos en las variables de fermentación, como la temperatura, el tiempo y la concentración de levaduras. La personalización de estos parámetros es clave para maximizar la calidad del producto final. A continuación, se analizarán las variables clave que deben considerarse para asegurar una fermentación controlada exitosa, especialmente en el contexto del sistema anaeróbico, donde el manejo preciso puede marcar la diferencia en la calidad del café producido.

Tabla 3. Control y buenas prácticas de fermentación.

CONTROL Y BUENAS PRÁCTICAS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CAFÉ	
Control de la calidad del café	Se recomienda que más del 80% del fruto cosechado sea maduro, se clasifique adecuadamente en agua limpia y no contaminada, desechando flotes y frutos dañados.
Control de la calidad de agua	Se requiere agua limpia, sin electrolitos ni disolventes de metales pesados y con un pH entre 6 y 8.
Control de temperatura	Esto es fundamental ya que depende de la región en la que se cultiva el café, por lo que es importante emplear equipos que permitan que acondicionen y refrigeren el aire circundante durante el proceso.

CONTROL Y BUENAS PRÁCTICAS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CAFÉ	
Control del tiempo de fermentación	Las fermentaciones abiertas duran de 14 a 18 horas con una temperatura promedio de 20 a 23°C, mientras que las fermentaciones sólidas y sumergidas duran de 18 a 30 horas con temperaturas que oscilan entre 13 y 17°C.
Control de mediciones fisicoquímicas	Se deben medir los niveles de pH y los grados Brix del mucilago de café, y se debe examinar su acidez, contenido de alcohol, contenido de lípidos y contenido volátil.
Control de lavado	El lavado de los granos de café es necesario para garantizar la calidad de la bebida y eliminar cualquier residuo químico que no desaparezca. Dependiendo del tipo de fermentación y de la cantidad de café puede ser necesario enjuagarlo varias veces con abundante agua.

Fuente. (Puerta Quintero y Echeverry Molina, 2015)

Por eso es difícil de cumplir el control y las buenas prácticas del proceso de fermentación del grano de café si se realizan procesos manuales, por lo que se requiere usar un fermentador que puede encargarse del control de variables más importantes como la temperatura, el PH y la humedad.

A continuación, se especifica qué es y cómo funciona un fermentador.

4.3.1.4. FERMENTADOR.

La fermentación en biorreactores es esencial para la producción de café de alta calidad. Estos sistemas controlan rigurosamente las condiciones necesarias, como temperatura y pH, para favorecer el crecimiento de microorganismos beneficiosos. En particular, los fermentadores anaeróbicos, al limitar la exposición al oxígeno, pueden resaltar sabores y aromas complejos en el café. Además, el diseño del fermentador debe adaptarse a factores como el medio de cultivo y las especies microbianas utilizadas, lo que garantiza la consistencia y calidad del producto final. Un fermentador bien diseñado no solo optimiza el proceso, sino que también permite un mejor control sobre las variables que afectan el perfil sensorial del café. (Rosales-López, 2019)

El principal inconveniente de este dispositivo es el elevado coste que supone adquirir un biorreactor comercial. Muchas empresas obtienen sus productos de fermentadores, que son dispositivos caseros de bajo costo que sirven como tanques de crecimiento de fermentación; sin embargo, a diferencia de los biorreactores comerciales, el movimiento no está regulado, pH medio, poca ventilación y no se puede tomar una muestra periódicamente debido a que se contamina el sistema. (Rosales-López, 2019)

El fermentador es un tanque que puede actuar sobre las características de la cepa microbiana que se esté manejando en ese proceso para generar un determinado metabolito. Este término es sinónimo de la palabra biorreactor, dependiendo de las características, la concentración de biomasa, el mantenimiento de las condiciones asépticas, las pruebas prácticas agrícolas, la transferencia de masa, energía y el mantenimiento de las condiciones óptimas de operación actúan sobre la eficiencia del fermentador. (Montoya y Bermúdez, 2018).

Hay que considerar el diseño del equipo o dispositivo que permita medir y controlar las variables que inciden sobre un proceso de fermentación en estado sólido o líquido, arrojado con ellos los datos necesarios y pertinentes para tomar decisiones frente al avance y éxito de la fermentación en la industria.

Los biorreactores más comunes son los de bandeja y tambor rotatorio. Recientemente, se ha empezado a usar el biorreactor de cama empacada o columna de lecho fijo para la fermentación en medio sólido. En los laboratorios, se prefieren los biorreactores de cajas Petri y matraces Erlenmeyer por su diseño sencillo y control de temperatura. Los procesos de fermentación en estado sólido se clasifican en dos categorías: a escala de laboratorio y a escala piloto e industrial. En ambos casos, es necesario implementar mediciones y controles para lograr el objetivo del proceso. (Ruíz et al., 2017).

A través de la Tabla No.4, se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de biorreactores que existen en el mercado.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de diferentes biorreactores.

BIORREACTORES		
Escala laboratorio		
Nombre	Ventajas	Desventajas
Columna	Económico, fácil montaje, monitoreo y control. Humedad, temperatura, biomasa y CO ₂ . Conexión en forma continuo de varias columnas.	Canales preferenciales de O ₂ , dificultad en la toma de muestra y problemas en la eliminación de calor.
Columna estéril	Control de humedad y temperatura. Sistema de esterilización previo inoculación y toma de muestra.	Formación de gradientes de concentración de O ₂ y nutrientes
Tambor horizontal	Mayor aireación y mezclado del sustrato. Existen varios diseños con modificaciones que mejoran la remoción del calor. Mejor transferencia del calor.	Daño de estructura micelial. Dificultad en el control de temperatura y humedad. Poco volumen utilizado en el tambor.
Proceso continuo	Menor tiempo de residencia. Mejor mezclado y crecimiento fúngico. Mayor asepsia.	Transferencia no homogénea de calor. Aglomeración de células por rompimiento micelial.
Escala piloto y/o industrial		
Lecho fluidizado	Operación de forma continua. Menor aglomeración de sustrato. Incremento en la transferencia de O ₂ y humedad. Variedad de configuración de soportes	Formación de altos esfuerzos cortantes que pueden afectar al microorganismo y rendimiento del producto

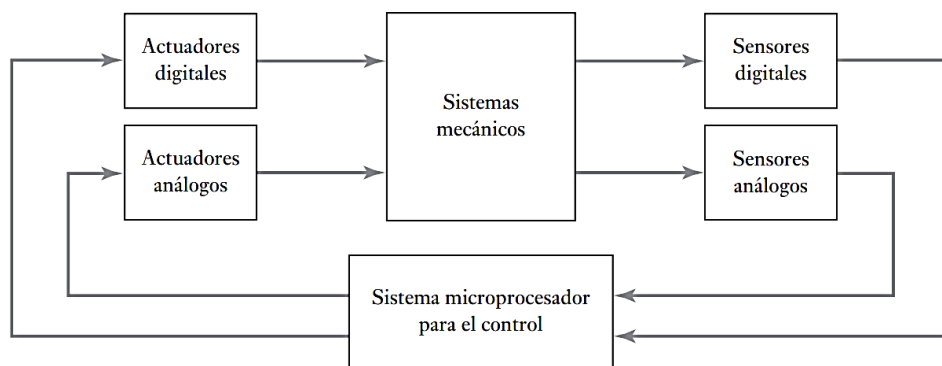
Fuente. (Ruíz et al., 2017)

En el Anexo B se puede observar la ficha técnica de los diferentes biorreactores que existen en el mercado, sus principales usos y características.

4.3.2. DISEÑO MECATRÓNICO

La Ingeniería Mecatrónica es la unión de varias ingenierías para diseñar y producir diferentes proyectos, prototipos o productos inteligentes. El proceso de diseño depende en gran medida del software analítico y de diseño, así como de la creación de prototipos virtuales. Con el software se puede crear prototipos virtuales de las ideas o proyectos que se tenga en mente siguiendo el proceso de diseño. (Blanco Ortega et al., 2018)

Figura 5. Elementos básicos del sistema mecatrónica.



Fuente. (Bolton, 2011).

La mecatrónica integra la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y de control para diseñar sistemas eficientes, económicos, confiables y adaptables. A diferencia del enfoque secuencial tradicional, la mecatrónica utiliza un enfoque participativo entre varias disciplinas, permitiendo una mayor adaptabilidad y eficiencia en el diseño y la implementación del sistema.

Los campos tecnológicos que comprenden sensores, sistemas de medición, sistemas de accionamiento, actuadores, sistemas de microprocesadores, análisis de comportamiento y sistemas de control están todos incluidos en el campo de la mecatrónica. (Bolton, 2011)

La Figura 7 muestra un diseño mecánico del chasis de un carro, resaltando los puntos clave de conexión de sus componentes. Este diseño es crucial para garantizar estabilidad y funcionalidad, utilizando métodos que optimizan la resistencia, durabilidad y facilidad de ensamblaje, lo que mejora tanto la seguridad del vehículo como su eficiencia operativa.

Las bases disciplinarias en el diseño de sistemas incluyen la mecánica de sólidos y fluidos, la transferencia de masa y momento, los procesos de fabricación, y las teorías de la electricidad y la información. Factores como el flujo de fluido, la transferencia de calor, la fricción, la transmisión de energía, la selección de materiales, los tratamientos termo mecánicos y las descripciones estadísticas son esenciales en el proceso de diseño. Estos elementos contribuyen a la eficiencia y efectividad del sistema. (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014)

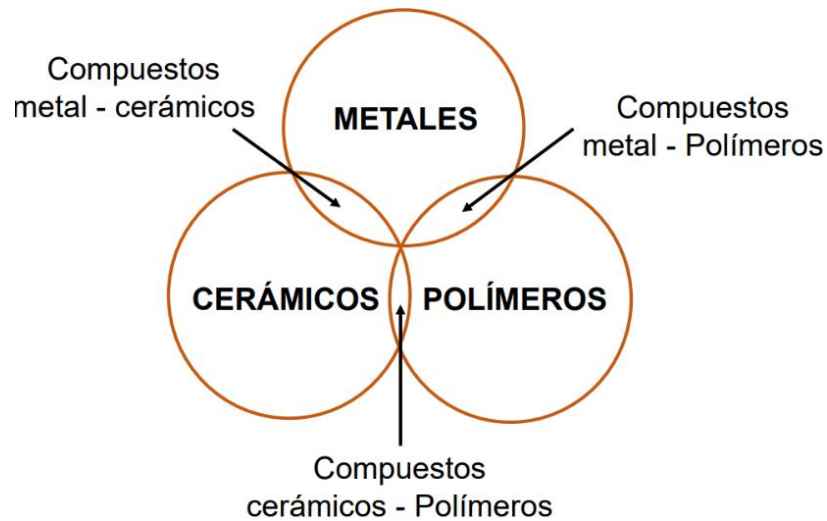
El proceso de diseño resulta en una descripción integral o especificaciones que incluyen dimensiones precisas, tipos de acabados superficiales, materiales, colores, tratamientos y actividades a realizar. Los diseños se comunican a través de planos, prototipos digitales o físicos, inventarios de componentes, requisitos del proceso de fabricación y códigos de control numérico. Las fases posteriores incluyen producción, embalaje, entrega, venta y servicios postventa. (Vanegas Useche, 2018)

4.3.2.1.1. TIPOS DE MATERIALES

Desde los albores de la civilización, los materiales han tenido un papel importante en la evolución de la humanidad, ya que se han utilizado para mejorar constantemente el nivel de vida. Debido a los nuevos planes y a la expansión de la industria de la ingeniería, ahora descubrimos una gran cantidad de materiales en el medio ambiente. Los metales, cerámicos, polímeros y compuestos son ejemplos de materiales. (Antonio Balvatín, 2016)

Los materiales, con los que interactuamos diariamente, son esenciales para el estudio debido a su manipulabilidad y estabilidad química. Sus características se definen por su estructura atómica, cristalina y microestructura. Los materiales de ingeniería se categorizan en metales, cerámicas o polímeros. Su composición física y química puede afectar el proceso de fabricación. (Ignacio-Martínez et al., 2021a). En la siguiente figura se ilustran los diferentes materiales.

Figura 8. Materiales.



Fuente. (Groover, 2018)

La Figura 8 presenta los tres grupos principales de materiales: metálicos, cerámicos y polímeros, cada uno con características específicas que los hacen adecuados para diversas aplicaciones. Los materiales metálicos son resistentes y dúctiles, ideales para estructuras duraderas, mientras que los cerámicos destacan por su resistencia al calor y la corrosión, perfectos para componentes en altas temperaturas. Los polímeros son versátiles y ligeros, útiles en la industria automotriz y en productos de consumo. Además, la combinación de estos materiales puede generar nuevos compuestos, optimizando así el rendimiento y la eficiencia de los productos finales.

- **Metales.**

Los metales tienen una fuerte conductividad de la corriente eléctrica y la banda de valencia está cerca de la banda de conducción. Esta resistencia aumenta con el calor. El oro, el acero, la plata y el magnesio son ejemplos de elementos metálicos. Estos materiales tienen una amplia gama de aplicaciones en la industria. (Ignacio-Martínez et al., 2021b) Los metales se clasifican en dos categorías: metales ferrosos y no ferrosos.

- **Metales ferrosos.**

Los metales ferrosos contienen hierro y acero. Estos metales son importantes en el comercio de minerales, representando un tercio de los envíos mundiales.

Aunque el hierro puro tiene ciertas ventajas económicas, su utilidad y valor comercial aumentan cuando se combina con carbono para formar acero y hierro colado. Estos metales ferrosos se usan en diversas industrias por sus propiedades únicas. (Groover, 2018)

- **Metales no ferrosos.**

Los metales no ferrosos son aquellos que no contienen hierro. Incluyen el cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo, zinc y cadmio. Estos metales se pueden combinar con otros elementos como molibdeno, cobalto, circonio, berilio, titanio y tántalo para formar aleaciones valiosas. Además, los metales preciosos como el oro, la plata y el platino también se clasifican como metales no ferrosos. Estos metales se usan en varias aplicaciones por sus propiedades únicas. (Daniel Francisco Pardo García, 2018)

- **Cerámicos.**

Los materiales cerámicos tienen baja conductividad ya que pocos electrones pueden superar el espacio prohibido. La energía necesaria para la transición de los electrones a la banda de conducción es alta, lo que podría dañar el material. Estos materiales son resistentes, duros, con alto punto de fusión y pueden ser cristalinos o amorfos. Son de baja densidad, dúctiles, cómodos y resistentes a impactos. Se utilizan en la fabricación de diversos productos como vidrio, productos de arcilla, refractarios y cementos. (Ignacio-Martínez et al., 2021).

Muchos materiales que se utilizan a diario llevan el término "cerámica" incluyendo cables eléctricos, techos, faros de coches y utensilios de cocina. Las cerámicas avanzadas son esencialmente lodo sedimentado, un material inerte que puede resistir presión y calor. El rendimiento de estos materiales se basa en la interacción de estas características. (Sanchez et al., 2017)

- **Polímeros.**

Los polímeros son materiales ampliamente utilizados, pero su vida útil limitada puede causar problemas de contaminación. A diferencia de los polímeros tradicionales que se basan en enlaces de carbono, la mayoría de los polímeros sintéticos se basan en enlaces de átomos inorgánicos, como el silicio. A diferencia del aluminio, el vidrio o las latas, los polímeros rara vez mantienen sus características físicas después del reciclaje. (Velandia Cabra, 2018)

- **Compuestos.**

Los materiales compuestos se crean combinando dos o más materiales con diversas características. Minimizan el uso de piezas individuales y tienen características mecánicas y térmicas. Estos implementos tienen formas y patrones. Estos dispositivos se pueden utilizar en una amplia gama de industrias en los sectores automotriz, aeroespacial, de ingeniería eléctrica y de construcción. Dentro de los métodos más empleados se encuentra la fusión, la extrusión, el moldeo por compresión e inyección, entre otros. (Ortega Díaz et al., 2022)

Para la construcción de un fermentador, se consideran materiales alternativos como el acero inoxidable, el polipropileno isostático y el vidrio. Según el Decreto 3075 de 1997, que especifica las buenas prácticas de manufactura con alimentos para consumo humano, hay que considerar las condiciones higiénicas y de sanidad. Además, se deben considerar parámetros como la transferencia de calor, la pérdida de material, la resistencia a la tracción y la dureza para seleccionar el material más adecuado para el prototipo. Esto asegura que el fermentador sea seguro, eficiente y duradero. (Rodríguez, S. A. 2022)

4.3.2.1.2. PROCESOS DE MANUFACTURA

La manufactura es una actividad importante que demuestra el potencial comercial de los bienes de capital al mejorar la utilización de los equipos, reducir los costos, generar valor para las empresas, los clientes y mejorar la productividad. La manufactura ha existido como una industria separada desde hace años, y esta área de la industria financiera se ha caracterizado por avances técnicos considerables provocados por una mayor productividad y tecnología. (Abeles et al., 2017)

- **Industrias manufactureras.**

La tecnología digital es fundamental para la "Industria 4.0", que implica la digitalización de la industria. Aunque integrar esta industria puede ser complicado y costoso, este estudio se enfoca en el uso de tecnologías digitales en procesos CAD, CAE y CAM frente a métodos tradicionales. La adaptación de estos procesos digitales a los desafíos económicos, sociales y ambientales plantea la necesidad de consideraciones adicionales. (Carro Suárez et al., 2019)

Tabla 5. Industrias manufactureras.

INDUSTRIAS ESPECÍFICAS DE LAS CATEGORÍA PRIMARIA, SECUNDARIA Y TERCIARIA.		
Primario	Secundario	Terciario (Servicios)
Agricultura	Alimentos procesados	Comercio al por mayor
Ganadería	Productos lácteos	Servicios de salud y bienestar
	Carnes procesadas	Venta de alimentos
Café	Fermentación anaeróbica	Consultoría en producción de café
	Maquinaria para fermentación	Distribución y logística
	Insumos para fermentación	Servicios de marketing y promoción
	Café molido	Restaurantes
	Bebidas de café	Distribución y logística
	Maquinaria para café	Formación de baristas
	Equipos de extracción	Catas y talleres de café

Fuente. (Groover, 2018)

Las industrias manufactureras son esenciales en la cadena de valor, mejorando la eficiencia y generando un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente (Betti et al., 2021). Dentro de estas, la agricultura, la ganadería y la producción de café son sectores clave que utilizan recursos naturales y crean empleo. El café, en particular, es vital no solo por su valor económico, sino también por su papel en el sustento de millones de personas en todo el mundo. Además, la industria secundaria transforma estas materias primas en bienes de consumo, mientras que la industria moderna se adapta a las demandas del mercado, buscando un desarrollo sostenible que beneficie a todos los involucrados.

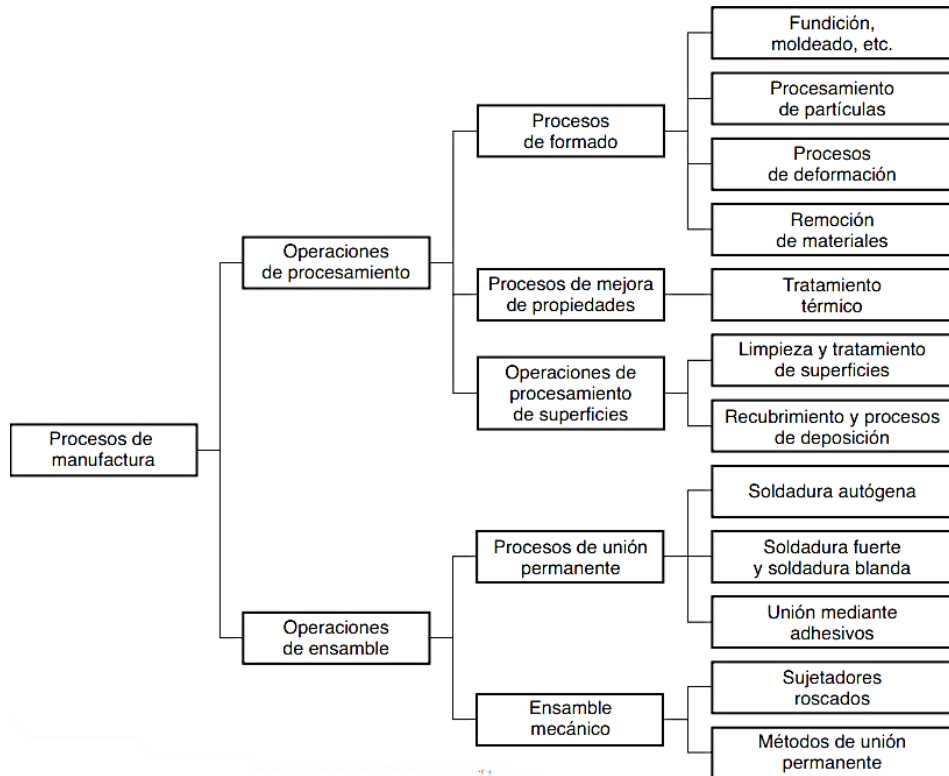
- **Procesos de manufactura.**

Las propiedades de un material pueden variar según su proceso de fabricación (fundición, laminado, forjado, tratamiento térmico). Estas propiedades pueden modificarse mediante procesos como el prensado o inyección mecánica. Los procesos como el recocido, laminado, extrusión o forjado generan tensiones residuales. Existen estrategias para manejar estas tensiones, como el uso de placas abrasivas, fuerzas mecánicas, tratamiento térmico y tratamiento de superficies, que mejoran la resistencia a la fatiga. (Vanegas Useche, 2018)

Las empresas deben adaptarse a las demandas sociales y a los nuevos conceptos de negocio para generar valor a largo plazo. Deben estar preparadas para las crecientes preocupaciones económicas, sociales y ambientales. Los

estudios futuros se centrarán en la digitalización, parte de la Industria 4.0, buscando reducir costos operativos y explorar alternativas de diseño mediante el desarrollo de software y la mejora continua. (Carro Suárez et al., 2019)

Figura 9. Procesos de manufactura



Fuente. (Groover, 2018)

- **Operaciones de procesamiento.**

La producción en serie convencional se basa en diseños de procesos o productos y utiliza diversas máquinas, como tornos, fresadoras y máquinas de grabado, que cortan metal. Además de requerir mano de obra, el mantenimiento de la maquinaria de fundición puede ser un desafío para las organizaciones de fabricación. Los componentes grandes se procesan en la planificación de la producción utilizando equipos especializados, a menudo con una automatización “sofisticada” para el manejo de materiales en maquinaria automatizada. (Zapata Urquijo y Muñoz Guevara, 2022)

Las tecnologías CAM incluyen sistemas informáticos que utilizan herramientas automatizadas para planificar, gestionar y controlar los procesos de

manufactura mediante una interfaz de cómputo con los recursos de producción de la planta. Una de las áreas más importantes de CAM es el control numérico computarizado (CNC); este enfoque comprende instrucciones para operar máquinas para cortar materias primas o transformarlas en piezas completas. (Sánchez Zamora y Lira Hernández, 2020)

- **Operaciones de ensamblado.**

El ensamble de piezas se conoce localmente como ensamblaje de superficie para ahorrar costos de mano de obra al reducir el tiempo de procesamiento. El enfoque técnico utilizado abarca desde la selección de proyectos, identificación de actividades y etapas de implementación hasta la evaluación del desempeño de las actividades propuestas, lo que se logra a través del análisis de planes de secuencia de procesos de ensamblaje, estudios de tiempos y actividades de Investigación. (Sauceda López et al., 2021)

4.3.2.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

La evolución de la electrónica, desde los circuitos de válvulas de vacío hasta los transistores y circuitos integrados, ha sido fundamental en el desarrollo del diseño electrónico. Esta disciplina se divide en electrónica analógica, que maneja magnitudes continuas, y electrónica digital, que trabaja con valores discretos (Lienig y Bruemmer, 2017). El diseño electrónico es crucial en numerosas aplicaciones modernas, incluyendo la electrónica de consumo, la televisión, y los sistemas de comunicación. Su impacto se extiende a áreas vitales como el radar, la navegación, los sistemas militares y los instrumentos médicos. Este avance ha permitido crear dispositivos más compactos y eficientes, transformando nuestra interacción diaria con la tecnología.

En la electrónica se utilizan componentes eléctricos que utilizan electrones para generar efectos positivos (luz, calor, movimiento, etc.). Cada circuito debe tener un generador, un transformador y un receptor. Los transformadores y generadores son dispositivos eléctricos que transforman la energía mecánica giratoria del bloque en energía eléctrica alterna y directa. El receptor puede ser serie, paralelo o mixto dependiendo de cómo esté conectado. (Rivera, 2014)

Los componentes eléctricos están conectados teniendo en cuenta el voltaje de suministro y el estado actual del sistema. Para combinar los componentes eléctricos y mecánicos, Se debe tener en cuenta la ubicación de los sensores y

actuadores en el prototipo, así como al cableado y conexiones de cada componente al microcontrolador para complementar es importante saber el voltaje de alimentación, la corriente consumida, las dimensiones y el costo. (Rodríguez, S. A. 2022)

4.3.2.2.1. TIPOS DE SENSORES

Colombia es un gran importador de componentes electrónicos entre los cuales se encuentran los sensores que son fundamentales para los proyectos de ingeniería, ya sean prototipos, circuitos, proyectos o entre otros. Hay muchos campos donde se requieren medir variables, como la automatización, la industria de sensores, las herramientas y la investigación son importantes en el desarrollo empresarial. (Nivia Vargas y Jaramillo, 2018).

El sensor primero detecta variables fisicoquímicas y después las transforma en señales eléctricas las cuales son temperatura, distancia, aceleración, humedad relativa, fuerza, Ph y presión, entre otros. El sensor se puede definir como dispositivo que utiliza sus cualidades para variar la señal que mide para luego ser leída en otro dispositivo. (Reyes-Flores, 2019)

- **Sensor de temperatura PT100**

El sensor de temperatura PT100 se utilizará en el proyecto por su alta precisión y estabilidad, lo que lo convierte en una herramienta confiable para controlar la fermentación del café. Su durabilidad, gracias a su encapsulado en acero inoxidable, y su costo accesible lo hacen ideal para pequeños caficultores.

El PT100 es un sensor de temperatura altamente preciso, hecho de un alambre de platino que presenta una resistencia de 100 ohms a 0 °C, aumentando con la temperatura para permitir mediciones exactas. Su encapsulado en acero inoxidable lo protege, haciéndolo ideal para aplicaciones críticas como la fermentación del café, donde el control de temperatura es esencial para asegurar la calidad del producto. Su durabilidad y fácil integración en sistemas automatizados no solo optimizan la producción, sino que también fomentan prácticas sostenibles en diversas industrias.(Onthank et al., 2023)

Figura 10. Sensor de temperatura PT100

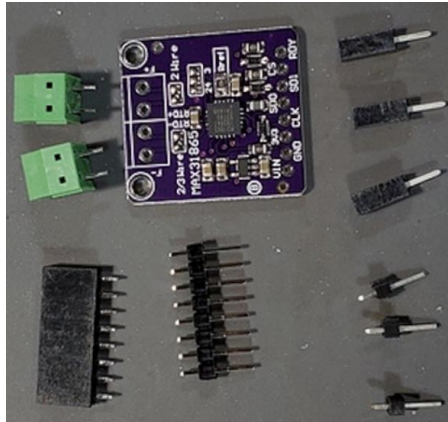


Fuente. (Ortega Ordoñez et al., 2023)

La figura siguiente ilustra el sensor RTD PT100, que mide la temperatura con un coeficiente positivo que incrementa su resistencia al aumentar la temperatura. Con un rango de operación de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, este sensor de tres hilos asegura mediciones estables y precisas, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones industriales críticas, como la fermentación del café, donde el control de temperatura es crucial para la calidad del producto. Su diseño robusto y su capacidad para integrarse fácilmente en sistemas automatizados facilitan la optimización de la producción y fomentan prácticas sostenibles, asegurando resultados consistentes y de alta calidad (Ortega Ordoñez et al., 2023).

El MAX31865 es un convertidor de resistencia a digital diseñado para detectores de temperatura de resistencia de platino (RTDs), como el PT100. Permite una fácil configuración mediante un resistor externo y utiliza un ADC delta-sigma de alta precisión. Con protección contra sobrevoltajes de hasta 45V y detección de condiciones de apertura y cortocircuito, garantiza un funcionamiento seguro. Su robustez y facilidad de integración lo hacen ideal para aplicaciones industriales, médicas e instrumentación, optimizando procesos y promoviendo sistemas automatizados eficientes. (Maxim Integrated, 2015)

Figura 11. Módulo Sensor temperatura MAX31865



Fuente. (Onthank et al., 2023)

El módulo MAX31865, mostrado en la Figura 11, es un convertidor de resistencia a digital para el sensor PT100, facilitando la conversión de RTDs a valores digitales. Compatible con sensores de 100 Ω a 1k Ω y conexiones de 2, 3 y 4 hilos, proporciona una resolución de 15 bits y una exactitud de ± 0.5 °C, esencial en aplicaciones industriales y médicas. Además, cuenta con protección contra sobrevoltajes de hasta 45V y detección de fallos, mejorando la fiabilidad y facilitando su integración en sistemas automatizados para optimizar la eficiencia. (Maxim Integrated, 2015)

- **Sensor de PH metro SEN0161**

En este proyecto se emplea el sensor de pH SEN0161 por su bajo costo y compatibilidad con Arduino, ideal para medir la acidez en la calidad del agua. Con un conector BNC, interfaz PH2.0 y un rango de medición de 0 a 14 pH, ofrece una precisión de ± 0.1 pH a 25 °C. Su calibración regular con soluciones estándar es crucial para un monitoreo efectivo. Además, cuenta con un LED indicador de alimentación y un potenciómetro para ajuste de ganancia, siendo una herramienta útil para el control de calidad del agua y la acuicultura (DFRobot, 2015).

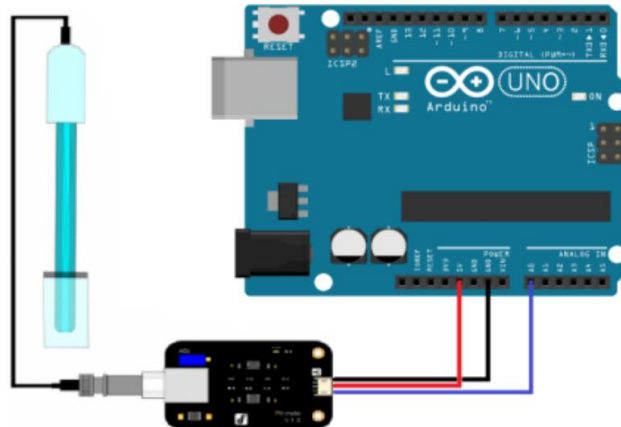
Figura 12. Sensor pH meter SEN0161



Fuente. (Yakin et al., 2021)

cómo se puede observar en la Figura el sensor de pH SEN0161 es fundamental para analizar el pH del café, midiendo la actividad de los iones de hidrógeno, donde una mayor concentración indica mayor acidez. Su diseño incluye un electrodo con solución electrolítica débil y un bulbo de vidrio delgado, lo que permite obtener mediciones rápidas y precisas. Este sensor es clave en diversas aplicaciones de monitoreo químico.(Yakin et al., 2021)

Figura 13. Conexiones entre Arduino y el Sensor de pH SEN0161



Fuente. (Karangan et al., 2019)

Para utilizar el sensor de pH SEN0161 con Arduino, es necesario un módulo que integre los datos de pH y los transfiera al Arduino para su visualización en una pantalla. Este sensor es crucial para medir la acidez o basicidad de soluciones, con un rango de pH de 0 a 14, y su precisión requiere calibración regular con soluciones estándar de pH 4.01, 7.00 y 10.00. Permite mediciones analógicas y digitales, ofreciendo resultados confiables en aplicaciones científicas y técnicas, lo que lo

hace esencial en laboratorios y en la industria alimentaria para el control de calidad.(Karangan et al., 2019)

- **Sensor de humedad DHT11.**

El sensor DHT11 es un dispositivo versátil y eficiente para medir temperatura y humedad, que ofrece lecturas confiables gracias a su salida digital calibrada. Equipado con un sensor de humedad resistivo y un sensor de temperatura NTC, se integra fácilmente con microcontroladores de 8 bits. Su capacidad de respuesta rápida y resistencia a interferencias lo hacen ideal para proyectos de monitoreo, como domótica y estaciones meteorológicas.(Lozada Contreras y Bautista España, 2024)

El sensor DHT11 es un periférico asequible para medir temperatura y humedad, con un rango de humedad del 20 al 90% RH y temperaturas de 0 a 50°C, logrando una precisión de $\pm 5\%$ RH y $\pm 2^\circ\text{C}$. Compuesto por un termistor y un sensor de humedad capacitivo, cuenta con un circuito integrado que convierte las señales analógicas a digitales y envía los datos mediante comunicación en serie. Su interfaz de un solo cable permite una respuesta rápida y sencilla, lo que lo convierte en una opción ideal para proyectos de monitoreo ambiental.(Molina Mosquera et al., 2023)

Figura 14. sensor de humedad DHT11



DHT11

Fuente.(Llamas, 2016)

El DHT11 es un sensor de temperatura y humedad asequible y versátil, ideal para proyectos educativos y básicos. Mide temperaturas de 0 a 50°C con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ y humedad del 20 al 80% con una precisión de $\pm 5\%$, a una frecuencia de muestreo de 1 muestra por segundo. Su diseño incluye una carcasa azul y cuatro pines, de los cuales se utilizan tres: Vcc, Output y GND, facilitando su

conexión con microcontroladores como Arduino. Con un costo aproximado de 0,70€, es una opción accesible para experimentar en mediciones ambientales. En resumen, el DHT11 es una herramienta eficaz para quienes buscan iniciarse en el monitoreo de temperatura y humedad.(Llamas, 2016)

Para obtener información detallada sobre los sensores disponibles en el mercado, se recomienda consultar el Anexo D. Este apartado ofrece un análisis completo de las características y aplicaciones de distintos modelos, siendo especialmente útil para principiantes.

4.3.2.2.2. TIPOS DE ACTUADORES

El actuador puede transformar la energía en movimiento o en fuerza. Puede tomar la energía de diferentes fuentes y transformarla en movimiento. Se pueden realizar tres tipos de movimientos lineales, rotacionales y oscilatorios (Corona et al., 2014). Los actuadores hidráulicos se utilizan cuando se requiere fuerza, mientras que los actuadores neumáticos se utilizan para un fácil posicionamiento. Los hidráulicos necesitan muchos equipos para el suministro de energía y mantenimiento periódico. (Núñez y Páez, 2013)

Según la fuente de energía se puede recomendar el actuador a utilizar para generar el movimiento deseado

En la actualidad, los motores eléctricos son esenciales en diversos sectores, como electrodomésticos, industria, robótica y dispositivos electrónicos. Entre ellos, el motor de corriente continua (DC) destaca por su eficiencia. Este motor convierte energía eléctrica en mecánica, utilizando un voltaje unidireccional en un sistema que incluye un estator fijo y un rotor móvil. Su diseño permite generar una tensión variable mediante un conmutador, asegurando un flujo continuo de corriente.(Zulkifli, 2021)

Figura 15. Motor DC



Fuente.(Yuski et al., 2017)

El control de motores de corriente continua (DC) se basa en la modulación del voltaje para regular velocidad y torque. Este método permite alcanzar un alto rendimiento desde cero hasta la máxima capacidad, aunque puede generar torque ripple. Además, la retroalimentación a través de mediciones de corriente o tensión optimiza el control, aunque el ruido en las señales puede representar un desafío. En resumen, un buen diseño y gestión de la señal son clave para un rendimiento óptimo en motores DC.(Xu et al., 2020)

Para obtener información detallada sobre los actuadores disponibles en el mercado, se sugiere consultar el Anexo E. Este apartado proporciona un análisis exhaustivo de las características y aplicaciones de diversos modelos, lo que resulta especialmente útil para quienes están comenzando en este campo.

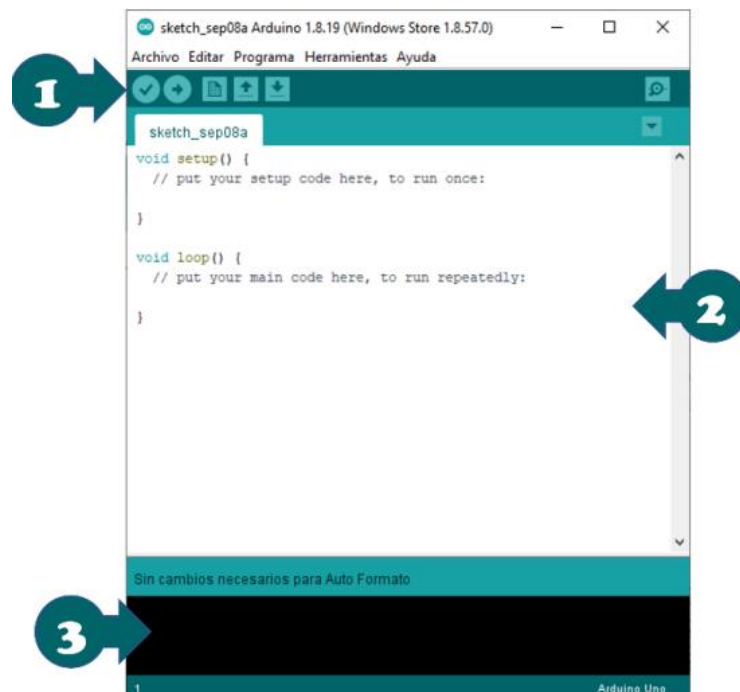
4.3.2.2.3. TARJETAS ELECTRÓNICAS

Los dispositivos basados en microcontroladores están encontrando aplicaciones en numerosos dominios del conocimiento debido al continuo desarrollo de sistemas integrados y tecnologías de IoT, como control de motores, sistemas de seguridad, sistemas de control de ascensores, monitoreo de generación de energía e investigación científica. Como resultado, temas como los sistemas integrados, los microcontroladores y el Internet de las cosas están adquiriendo mayor importancia en la educación científica y tecnológica (Pereira et al., 2022).

- **Arduino**

El entorno de programación de la placa Arduino se conoce como entorno de desarrollo integrado (IDE) viene con un editor de código, un foro y un panel que permite crear y cargar archivos en la memoria del microcontrolador para interactuar con los componentes físicos de la placa Arduino. Las tres secciones que conforman el programa Arduino son: Las opciones superiores del IDE, el cuadro de edición donde escribimos el código del ordenador y el centro de mensajes que muestra la consola. El IDE es un software gratuito con instrucciones de compilación y código fuente accesible en GitHub. (Pérez, 2023)

Figura 16. Arduino.



Fuente: (Pérez, 2023).

El software Arduino permite el uso de librerías, condicionales y variables que facilitan el desarrollo de códigos de programación y una pantalla para ver las variables en el monitor. Cada vez que se inicia Arduino IDE, se deben de considerar dos funciones de manera obligatoria void setup y void loop. Además, cuenta con una fácil conectividad a los componentes electrónicos para la implementación y construcción de diferentes proyectos, prototipos, entre otras áreas donde este software es muy utilizado. (Rodríguez, S. A. 2022).

La sintaxis o lenguaje de programación que se utiliza en este software se explicara a continuación.

El lenguaje de programación C es uno de los más populares y versátiles, ampliamente utilizado en diversos sistemas operativos y plataformas. Su diseño permite modificar componentes con un conjunto reducido de instrucciones en lenguaje de máquina, eliminando la necesidad de un entorno de ejecución complejo. Esta característica lo convierte en una opción ideal para el desarrollo de sistemas operativos y software de bajo nivel, facilitando una programación eficiente y cercana al hardware. Además, ofrece un nivel básico de abstracción que lo hace fundamental para muchos desarrolladores, asegurando su relevancia continua en la industria del software (Goin, 2022).

Figura 17. Lenguaje C.

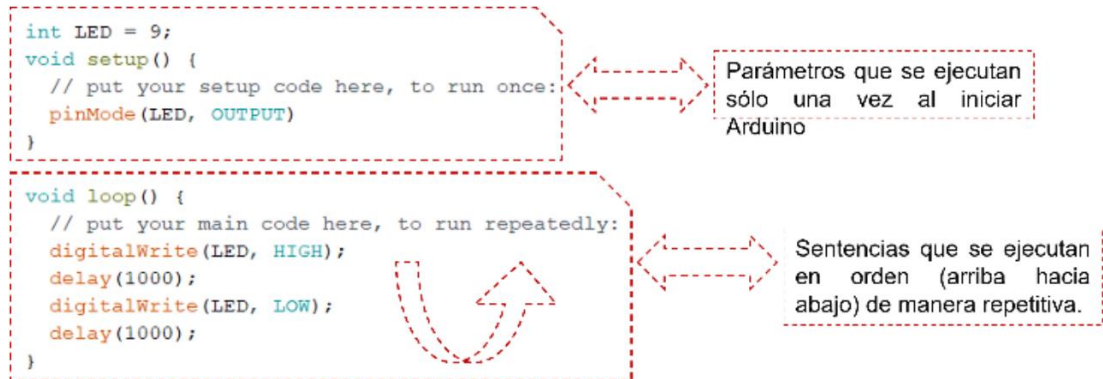


Fuente. (OpenWebinars, 2019)

Una sintaxis es una colección de reglas que regulan la estructura de un programa correcto en C. Los programadores deben comprender varios principios, cómo comienza una línea de código en C, cómo termina o cuándo usar, por ejemplo, comillas o llaves, el lenguaje en C hace distinción entre mayúsculas y minúsculas.

Por tanto, es posible decir que estos caracteres son componentes menores de los programas en lenguaje C que utilizamos. Variables, punteros, constantes, palabras clave, símbolos e instrucciones son sólo algunos ejemplos. (OpenWebinars, 2019)

Figura 18. Partes de la interfaz de Arduino.



Fuente. (Pérez, 2023).

Las bibliotecas más utilizadas son `stdio.h` (para importación y exportación), `conio.h` (para gestión avanzada de documentos), `math.h` (para cálculos matemáticos) y `time.h` (para fecha y hora actuales). Debido a su proximidad a lenguajes que necesitan otras formas de programación y desarrollo de software, como Java, podemos argumentar que el lenguaje de programación C es excelente para construir sistemas operativos. (OpenWebinars, 2019)

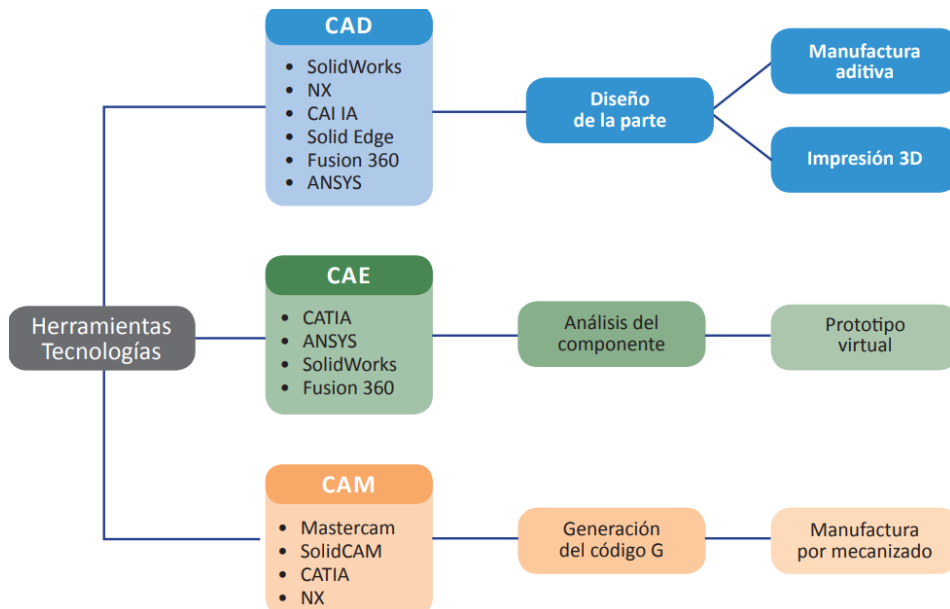
4.3.2.3. DISEÑO COMPUTACIONAL

Empleamos herramientas de simulación digital para implementar operaciones mecánicas y electrónicas, la manufactura digital aporta repetibilidad, calidad y estandarización en la producción de tal forma que para un desarrollo futuro se facilita su producción a escala, ahorrando costos y reduciendo reprocesos. Un ejemplo de un diseño asistido por computadora (CAD) es un controlador de granos de café en un tanque de fermentación. Los sensores de temperatura y humedad relativa se configuran de acuerdo con la prueba del café. (Plazas Pemberthy, L. 2022).

El Diseño Asistido por Computador (CAD), la Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y la Manufactura Asistida por Computador (CAM) son técnicas que utilizan computadoras en todas las etapas de diseño, análisis y fabricación de un producto. Estos estándares son vitales para la industria, ya que permiten satisfacer las demandas de mejora de la calidad del producto, reducción de costos y minimización del diseño, la ingeniería y la producción. Estas técnicas han

revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican los productos. (Sánchez Zamora y Lira Hernández, 2020)

Figura 19. Herramientas tecnológicas.

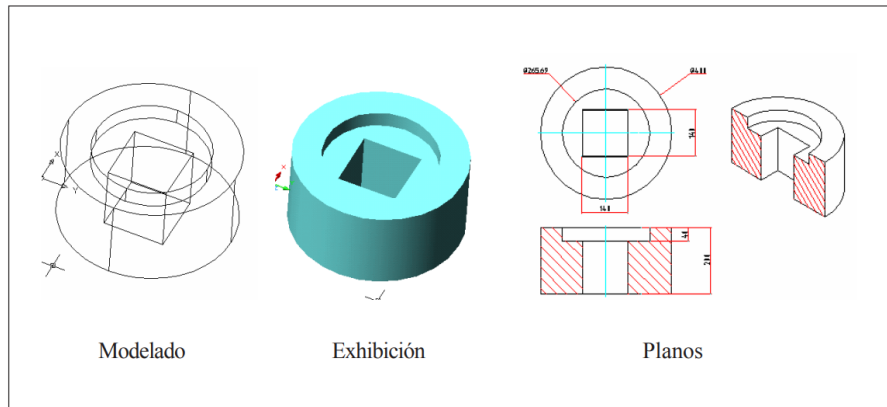


Fuente. (Sánchez Zamora y Lira Hernández, 2020b)

4.3.2.3.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)

El software CAD se puede implementar de dos maneras: a través de lenguajes de programación y paquetes de aplicaciones. Conocimiento de lenguajes de programación abiertos y técnicas de representación (principalmente utilizando software gratuito como: Java y Visual Basic); Por otro lado, el uso de paquetes de software permite un desarrollo rápido y eficiente en una variedad de áreas de aplicación, así como una arquitectura abierta y simplicidad de uso debido a una rápida instalación e implementación. (Rojas Lazo y Rojas, 2014)

Figura 20. Usos del dibujo asistido por computadora



Fuente. (Rojas Lazo y Rojas, 2014)

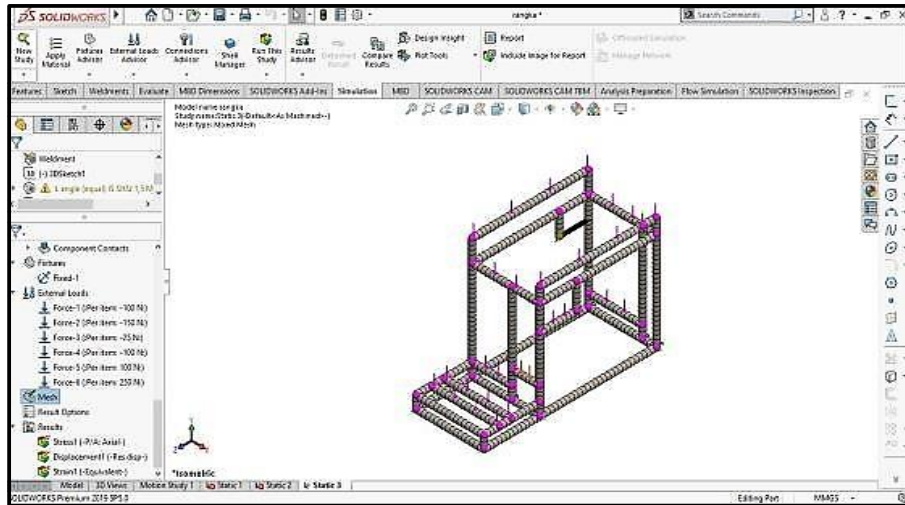
Los gráficos por computadora se utilizan para representar y desarrollar cosas complejas, geometría, dibujos; modelos matemáticos; procesos de diseño, modelos 3D, programas, realidad virtual y robótica. Los sistemas CAD están evolucionando rápidamente, tanto el software como el hardware siempre están mejorando y sus aplicaciones en la educación y la industria han aumentado. (Rojas Lazo y Rojas, 2014)

A continuación, se puede observar un ejemplo de un software de diseño asistido por computadora.

- **SolidWorks.**

El programa SOLIDWORKS permite modelar componentes y ensamblajes 3D a partir de planos 2D. Con la ayuda de sus herramientas, los usuarios pueden producir, gestionar, publicar y desarrollar datos relacionados con el proceso de diseño. Desempeña una posición especial en el proceso de desarrollo de productos, ya que sus soluciones sirven para agilizar tareas, ahorrar tiempo, dinero y abrir posibilidades de innovación. (Solid Business Intelligence s.l., 2021).

Figura 21. SolidWorks.



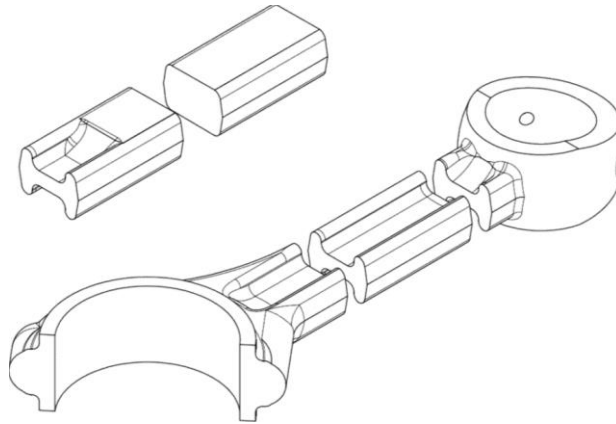
Fuente. (Furqani et al., 2022)

Como se puede observar en la Figura 21, SolidWorks es un programa esencial que brinda soluciones prácticas en cada etapa del proceso de diseño. Ofrece una amplia variedad de herramientas que mejoran la eficiencia y efectividad en el desarrollo de productos (Solid Business Intelligence s.l., 2021). Este software permite a ingenieros y diseñadores visualizar proyectos en 3D antes de su construcción física, y su capacidad para realizar simulaciones y análisis de rendimiento lo ha establecido como un estándar en la industria del diseño asistido por computadora, facilitando el desarrollo de modelos complejos con mayor precisión y eficacia.

4.3.2.3.2. INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE)

Los entornos de ingeniería asistida por computadora (CAE) ayudan a los diseñadores a tomar decisiones significativas, probar diseños durante la fase de solución y determinar las compensaciones óptimas entre posibilidades para evitar iteraciones en el proceso de diseño. Circunstancias de producción, alternativas y costos. la tecnología de inteligencia artificial permite el análisis de datos de producción, el reconocimiento de patrones y la generación automática de nuevos conocimientos de producción. (Brockmöller et al., 2020)

Figura 22. Ingeniería Asistida por Computador



Fuente. (Brockmöller et al., 2020)

Un entorno de ingeniería asistido por computadora (CAE) es un sistema que facilita la gestión y coordinación de la información empresarial y la comunicación de datos entre todas las partes interesadas. Los sistemas de diseño e ingeniería basados en la ciencia utilizan conocimientos formales y explícitos integrados en sistemas de síntesis y análisis. Algunos ejemplos de la aplicabilidad de CAE son: el diseño de dispositivos, ingeniería automotriz y aeroespacial o ingeniería mecánica y de instalación. (Brockmöller et al., 2020) A continuación se puede observar algunos softwares de ingeniería asistida por computadora.

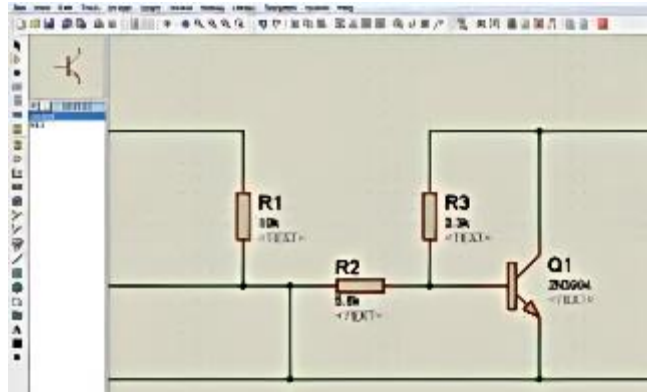
- **Proteus**

Proteus VSM es un sistema basado en circuitos que permite la interacción de varios componentes en un solo circuito para diseño electrónico analógico, digital o híbrido. Se incluyen pantallas de visualización, componentes dinámicos y amplios sistemas de creación y procesamiento de señales. La capacidad de simular circuitos acoplados a microprocesadores o microcontroladores es una característica crucial que convierte a Proteus VSM en el simulador preferido de muchos expertos y aficionados a la electrónica. (Redusers, 2014)

Este programa se divide en dos secciones. Uno de ellos es el módulo ISS, que nos permite construir y simular circuitos electrónicos. Proteus contiene una unidad ARES que fabrica placas de circuito impreso (PCB) para ensamblaje de circuitos fácil y rápidamente. Aunque utilizar esta aplicación es relativamente sencillo, en ocasiones deberás tener cuidado ya que el programa te solicitará que

realices cambios si un componente se coloca en el mismo lugar que otro. (Redusers, 2014).

Figura 23. Circuitos electrónicos.



Fuente. (Redusers, 2014).

Como se muestra en la Figura 23, Proteus es una herramienta clave para el diseño y simulación de circuitos electrónicos, permitiendo a los usuarios crear esquemas, modelar componentes e identificar interacciones (Redusers, 2014). Es fundamental aprender los conceptos básicos del diseño de circuitos en Proteus, ya que el dibujo inicial del circuito es esencial para su desarrollo efectivo. Su capacidad de simulación ofrece una visualización clara del proyecto antes de la construcción física, lo que ayuda a ingenieros y diseñadores a detectar y resolver problemas en la etapa de diseño. Por estas razones, Proteus se ha convertido en una opción indispensable para optimizar proyectos electrónicos.

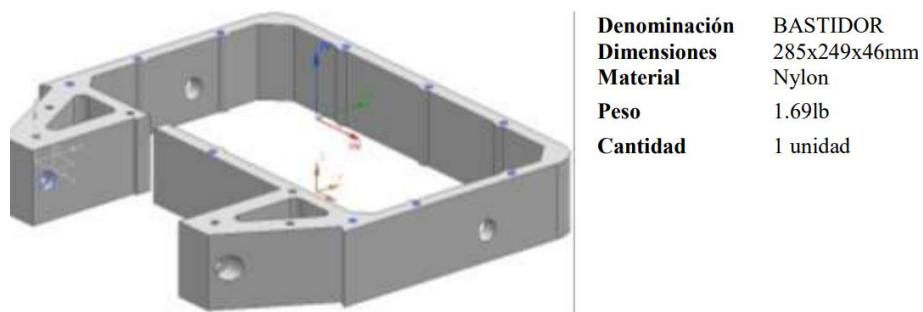
4.3.2.3.3. MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAM)

La Manufactura Asistida por Computador (CAM) utiliza software y máquinas controladas por computadora para mejorar la eficiencia y precisión en la fabricación, asegurando altos estándares de calidad (Ntemi et al., 2022). Es crucial para el control de herramientas durante el mecanizado y optimiza sistemas híbridos en el mercado (Feldhausen et al., 2022). CAM es especialmente importante en las industrias automotriz y médica, facilitando la creación de prototipos y la personalización de productos, lo que reduce tiempos de lanzamiento y mejora la calidad.

A continuación, se puede observar un ejemplo de aplicación de la manufactura asistida por computadora (CAM).

Las competencias de robots de batalla destacan por su ingeniería avanzada y sirven como plataforma para aplicar conocimientos en diseño, electrónica y programación. Los diseñadores utilizan tecnologías como software CAD/CAM e impresión 3D para crear robots funcionales y duraderos. El bastidor, hecho de aluminio aeronáutico, es crucial para proteger los componentes del robot durante las competencias, como se ilustra en la figura adjunta. (Escobar Guachambala et al., 2019)

Figura 24. bastidor del robot batalla



Fuente: (Escobar Guachambala et al., 2019)

En la Figura 24 se presenta el diseño del bastidor de un robot de combate, incluyendo sus dimensiones y material. Tras mecanizar las piezas con Manufactura Asistida por Computador (CAM), se realizó el ensamblaje y pruebas, logrando un peso final de 11.8 libras, cumpliendo con los requisitos de la categoría de 12 libras (Escobar Guachambala et al., 2019). Este proceso resalta la importancia de CAM en la precisión y eficiencia del diseño y fabricación de componentes para competiciones.

4.4. MARCO CONCEPTUAL

Actuador: Convierte la energía de señales eléctricas, hidráulicas, neumáticas u otras en una acción controlada. Un motor eléctrico es un ejemplo común de actuador eléctrico, adecuado para diversas aplicaciones. (Wang y Herath, 2022)

Automatización: Se refiere al uso de diversas tecnologías para supervisar y controlar de forma remota procesos, máquinas o equipos que realizan tareas repetitivas. Esto ayuda a aumentar la productividad, reducir costos y asegurar la calidad del producto. (Martínez, 2019)

Anaeróbica: Es un proceso el cual se realiza en ausencia de oxígeno que convierte la materia orgánica en biomasa y compuestos orgánicos volátiles. En la actualidad se ha vuelto una tecnología competitiva frente a otras opciones. (Márquez y Martínez, 2011)

Bacterias lácticas: Son microorganismos que realizan fermentación y producen metabolitos importantes, como ácido láctico y bacteriocinas, que tienen actividad antimicrobiana. (Agurto-Sáenz y Gorbeña-Ramos, 2008)

CAD: Los sistemas CAD (diseño asistido por computadora) permiten crear representaciones interactivas de productos y componentes. Ofrecen imágenes en 3D que se pueden ampliar, rotar y recortar, facilitando su comprensión para diseñadores y fabricantes. (Erazo-Arteaga, 2022)

CAE: El software de Ingeniería Asistida por Computador (CAE) se utiliza para el diseño, simulación, validación y optimización de productos y procesos en diversas industrias. (Erazo-Arteaga, 2022)

CAM: Los métodos de fabricación asistidos por computadora se utilizan para análisis, estimación de tiempos, creación de piezas y componentes, y para optimizar sistemas y reducir costos laborales mediante software específico para máquinas. (Erazo-Arteaga, 2022)

Café: El café es una bebida popular en todo el mundo, producido a partir de semillas del cafeto. Su calidad depende de un ambiente adecuado y buenas prácticas agrícolas. (Echeverri et al., 2005)

Cafeteros: Persona que vive en el campo y se dedica a cultivar y procesar café en su terreno obtiene beneficios económicos, sociales y ambientales. (Roach et al., 2021)

Control: Es un campo del conocimiento importante en la ingeniería y en la ciencia que impulsa el avance tecnológico, mejorando el rendimiento de sistemas autónomos y, por ejemplo, comparando la velocidad de los humanos con la de las máquinas. (Dorf y Bishop, 2005)

Diseño: Es un campo artístico que combina creatividad y flexibilidad con ciencias naturales, ingeniería y matemáticas. Incluye actividades para diseñar artefactos, sistemas y procesos que cumplen objetivos específicos. (Pérez y Meneses Villagrà, 2021)

Eficiencia: Uso adecuado de herramientas para alcanzar los objetivos y optimizar recursos en los procesos y personas (Quintero et al., 2021).

Eficacia: Relación entre objetivos y resultados en condiciones ideales, que facilita alcanzar las metas y cumplir los objetivos organizacionales. (Quintero et al., 2021)

Fermentación: Es un proceso anaeróbico que transforma moléculas orgánicas complejas en compuestos más simples, generando ATP y productos claves como lácteos y bebidas alcohólicas. Es fundamental para la industria alimentaria y la producción de biocombustibles, contribuyendo también a la sostenibilidad ambiental. (ARREOLA, 2022)

Fermentador: Es un recipiente diseñado para crear un ambiente biológicamente activo y facilitar bioprocesos, conocido como biorreactor, para obtener el resultado deseado. (Guzmán Farfán et al., 2021)

Fruto: Es un órgano vegetal que protege las semillas de las angiospermas. Su variabilidad y adaptaciones facilitan el transporte y lo convierten en una fuente de alimento para animales y humanos, dinamizando los ecosistemas. (Inveron et al., 2012)

Hardware: Es el conjunto de piezas físicas que forman dispositivos, máquinas y equipos electrónicos, incluyendo todos los elementos estructurales como la pantalla y el teclado. (Goodwill Community Foundation Global, 2021)

Humedad: La humedad absoluta mide la cantidad de vapor de agua en el aire, mientras que la humedad relativa compara esta cantidad con la máxima que el aire puede contener. (Cuenta y Compras, 2019)

Levaduras: Son organismos unicelulares microscópicos que se encuentran en el suelo, plantas, frutas y animales. Actúan como descomponedores de materia muerta en ecosistemas y obtienen energía al fermentar azúcares. (Juan Castillo, 2019)

Lixiviados: Los lixiviados se forman en vertederos durante la fermentación y descomposición de materia orgánica. La lluvia filtra a través de los residuos, arrastrando compuestos químicos y materiales biológicos, y produce un efluente muy contaminante. (Selena-Mesías et al., 2022)

Microbiota: Es una colección de microbios (bacterias, hongos, arqueas, virus y parásitos) en el cuerpo que produce metabolitos y nutrientes beneficiosos para la salud intestinal. La pérdida de esta biodiversidad puede causar problemas de salud. Aunque "microbioma" y "microbiota" se usan como sinónimos, ambos términos se refieren al conjunto de microorganismos, sus genes y el entorno en el que viven. (Álvarez-Calatayud et al., 2018)

Monitorear: El monitoreo implica recopilar, observar y evaluar datos para supervisar un programa o evento. Se enfoca en reconocer, controlar e informar sobre el estado de las circunstancias, incluyendo el tipo de trabajo, el momento, el lugar, los responsables y los beneficiarios. (ConceptoDefinicion, 2020)

Mucilago: Sustancia orgánica viscosa, similar a la goma, que se encuentra en ciertos vegetales. (Nereida Villa-Uvidia et al., 2020)

Ph: El pH mide la acidez o basicidad de una sustancia, indicando la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) e hidróxido (OH⁻). Se utiliza papel tornasol, que cambia de color para mostrar si la sustancia es ácida o básica. (REYES, 2022)

Postcosecha: Es un conjunto de actividades de postproducción para eliminar componentes no deseados y mejorar la apariencia del producto, que incluye limpieza, lavado, selección, categorización, desinfección, secado, empaque y almacenamiento, cumpliendo con los estándares de calidad para productos frescos y procesados. (Riveros, 2006)

Programación: Son los principios de algoritmos, programación y su aplicación en ingeniería, que definen las evidencias y criterios de desempeño según el objetivo a alcanzar. (Jiménez-Toledo et al., 2019)

Sensor: Son dispositivos que miden magnitudes físicas y químicas, convirtiéndolas en señales eléctricas. Pueden medir variables como temperatura, distancia, fuerza, presión y humedad, facilitando su uso en diversas actividades. (Colagrossi et al., 2022)

Software: Un programa o aplicación es un conjunto de instrucciones que permite a una máquina funcionar correctamente. Incluye sistemas operativos, aplicaciones, navegadores y juegos, y todos ellos trabajan para realizar diversas tareas en diferentes dispositivos electrónicos. (Goodwill Community Foundation Global, 2021)

Temperatura: La temperatura es una magnitud escalar que refleja la cantidad de energía cinética de las partículas en una sustancia. A mayor velocidad de las partículas, mayor es la temperatura. (Leskow, 2022)

4.5. MARCO LEGAL

Las normativas en un proyecto son fundamentales porque establecen reglas claras para todos los involucrados. No solo aseguran el cumplimiento de la ley, sino que también promueven prácticas responsables y sostenibles. Esto muestra el compromiso del equipo con la calidad del proyecto y con estándares éticos y ambientales. Es importante tener claro y seguir estas normativas para evitar problemas y garantizar el éxito del proyecto a largo plazo.

Tabla 6. Normatividad del café.

Normatividad	Resumen
Norma ISO 9001:2015	Esta norma nos habla sobre la planificación, ejecución, control y corrección continua de los procesos para asegurar la confianza y satisfacción de clientes y partes interesadas. Fomenta una cultura de prevención, mejora, protección del medio ambiente, seguridad alimentaria y calidad en productos y servicios. (da Fonseca et al., 2019)
Norma ISO 22000:2018	Esta norma busca que todas las organizaciones en la cadena alimentaria, desde la recolección de frutas hasta el producto final, cumplan con los requisitos para garantizar la seguridad alimentaria. (Chen et al., 2020)
LEY 76 DE 1927	Esta ley promueve prácticas agrícolas sólidas para proteger el café, mejorar la calidad de los productos, proteger a los trabajadores y prevenir enfermedades relacionadas con la producción y el clima.
Decreto 1686 de 2012	Establece las normas higiénicas para la producción, preparación, empaque, distribución y comercio de bebidas alcohólicas destinadas al consumo humano. (Espinosa Gutiérrez y Hernández Cruz, 2021)
Decreto 3075 de 1997 y Resolución 2674 de 2013	Las empresas de procesamiento de alimentos deben seguir los estándares de buenas prácticas de manufactura, garantizando que los productos se fabriquen en condiciones limpias y seguras en cada etapa del proceso. (Torres, 2015)

Normatividad	Resumen
ICONTEC NTC 2758:2021	Garantizar que el producto final cumpla con excelentes condiciones sensoriales, evaluando cuidadosamente los sabores y olores específicos del café para identificar sus cualidades para el consumidor.
ICONTEC NTC 5181:2003	Las buenas prácticas de manufactura (BPM) aseguran un proceso uniforme y condiciones sanitarias adecuadas, reduciendo riesgos y controlando cada lote de café.
UTZ Certified Good Inside	Producción responsable del café que cumple con criterios sociales y ambientales, incluyendo la sostenibilidad económica y social para los trabajadores, y prácticas agrícolas respetuosas con el medio ambiente- (García, 2014).
C.A.F.E. Practices.	El programa de verificación de Starbucks asegura que los proveedores cumplan con estándares de calidad y se comprometan con la responsabilidad económica, social y ambiental en toda la cadena de producción del café. (Starbucks, 2020).
Comercio Justo, Fair Trade	El objetivo es fomentar el compromiso y la colaboración entre productores y clientes para mejorar mutuamente. El sello exige producción sostenible, buenas prácticas agrícolas, cuidado de los recursos naturales, y principios de democracia, participación, y transparencia económica.(Stelzer y Gonçalves, 2021).
Codex Alimentarius	El Codex Alimentarius es un conjunto de normas y documentos diseñados para proteger la salud del consumidor y garantizar prácticas uniformes en la industria alimentaria. (“Comisión Del Codex Alimentarius Manual de Procedimiento,” 2023)

Fuente. Propia del autor

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. TIPO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque utilizado en este trabajo corresponde a una ***modalidad mixta con una metodología cuantitativa y cualitativa.***

El diseño metodológico del proyecto se refiere al conjunto de prácticas utilizadas por los investigadores para adquirir conocimiento y abordar problemas o preguntas específicas. Este enfoque abarca desde la simulación del funcionamiento y la orientación hacia la comprensión de la realidad, hasta las técnicas para recopilar y analizar información. La elección adecuada de este diseño es fundamental, ya que determina la validez y relevancia de los resultados obtenidos en la investigación (Navarro et al., 2017, p. 21).

Lerma (2009), según la metodología utilizada, plantea dos clases de investigaciones: cuantitativas y cualitativas. De cada una se desprenden varios tipos, según el problema, el objetivo y la hipótesis planteados.

En primer lugar, la metodología utilizada es de tipo cuantitativa, ya que se medirá y analizará diversas variables para generar conclusiones. En este caso específico, se evaluarán la temperatura, el pH y la humedad relativa del proceso de fermentación anaeróbica del café con el fin de estandarizar dicho proceso.

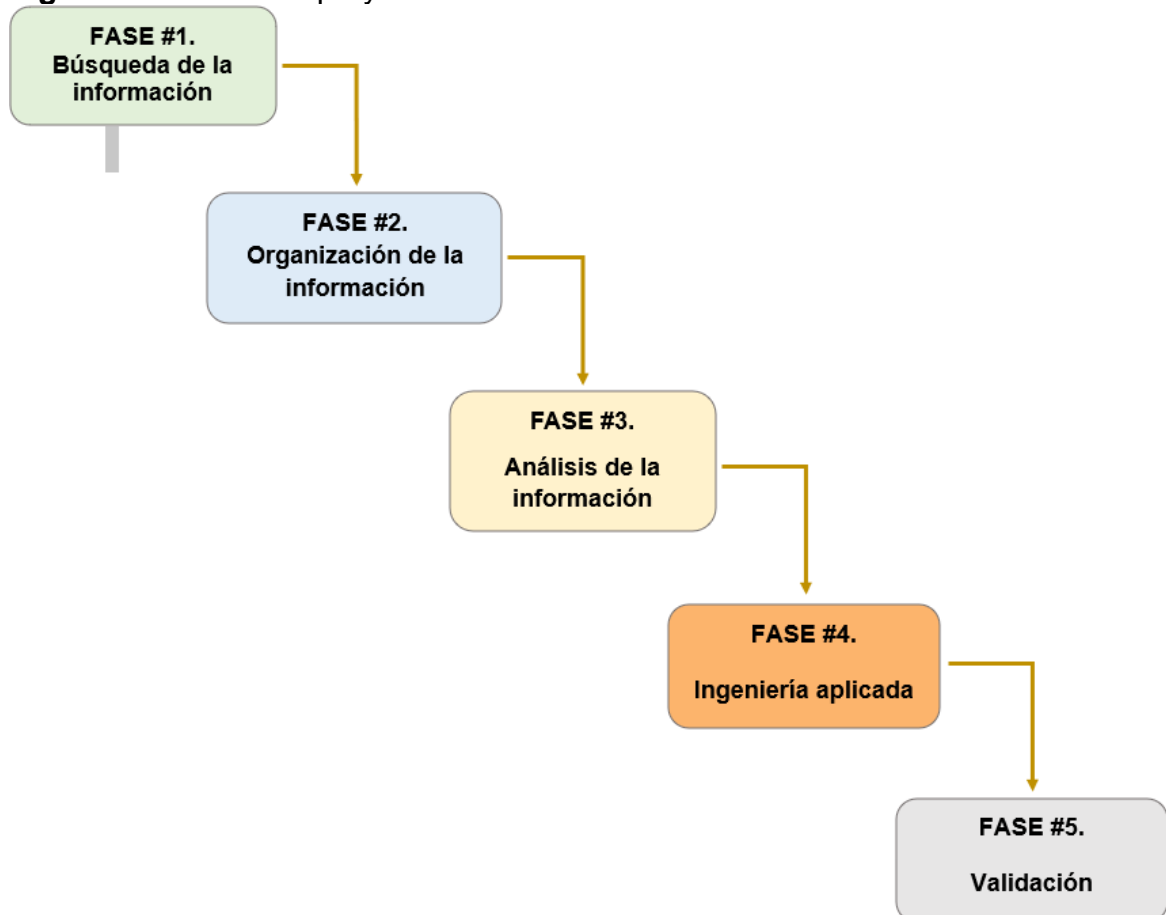
El diseño metodológico del proyecto emplea una investigación que detalla las propiedades y características del proceso de fermentación controlada en cafés especiales. Este enfoque permite recopilar información integral sobre las variables del objeto de estudio, mejorando la comprensión de su impacto en la calidad del café.

5.2. ETAPAS DE LA METODOLOGIA DEL PROYECTO

Para el correcto desarrollo del proyecto se requiere una planificación cuidadosa y la implementación de varias fases para garantizar su éxito. Estas fases incluyen la búsqueda de información, la organización de la información, el análisis de la información, la aplicación de la ingeniería y la validación.

Cada una de estas fases es crucial para el desarrollo exitoso del proyecto y para asegurar que se cumplan los objetivos establecidos. Al seguir estos pasos, se puede garantizar que el proyecto se desarrolle de manera eficiente y efectiva.

Figura 25. Fases del proyecto.



Fuente. Propia del autor

A continuación, se explicarán las fases que conforman la metodología del proyecto para la correcta obtención de resultados de este.

FASE #1. Búsqueda de la información

La primera fase de este proyecto es crucial, ya que establece la base para todas las etapas posteriores. Esta fase implica una búsqueda exhaustiva y la recopilación de información de diversas fuentes bibliográficas reconocidas, como Cenicafé, Science Direct, Google Académico y Scopus.

El objetivo principal es recopilar toda la información relevante y actualizada sobre el sistema automatizado y monitoreado para estandarizar el proceso de fermentación anaeróbica del café. Este enfoque está destinado a beneficiar a los pequeños caficultores de Colombia, proporcionándoles acceso a técnicas de producción de café de vanguardia.

Al basar el proyecto en los hallazgos y técnicas más recientes en el campo de la producción de café, se garantiza que los resultados sean relevantes, precisos y de alta calidad. Esta recopilación de información no solo informa el diseño y la simulación del proyecto, sino que también contribuye a su validez y credibilidad.

FASE #2. Organización de la información

En el proyecto se realizó una búsqueda detallada de la información más relevante y alineada con los objetivos establecidos. Se implementó un proceso sistemático de almacenamiento de documentos que asegura una organización efectiva de la información, facilitando el acceso y la consulta de datos clave. Esta estructura optimiza la gestión de la información y permite una revisión ágil y un análisis exhaustivo, garantizando que todos los aspectos del proyecto estén respaldados por datos organizados y accesibles.

Los datos bibliográficos, el resumen y las conclusiones de cada fuente se registrarán cuidadosamente en esta matriz. Esta matriz no solo organiza la información de manera eficiente, sino que también facilita el acceso y la recuperación de datos cuando sea necesario.

Además, esta matriz servirá como base sólida para el análisis posterior. Al proporcionar una visión general clara de la información recopilada, la matriz permitirá una evaluación y comparación efectiva de las diferentes fuentes. En última instancia, este proceso de almacenamiento de documentos mejora la eficiencia del proyecto y asegura que todas las decisiones tomadas en las etapas posteriores estén bien informadas y basadas en datos sólidos.

FASE #3. Análisis de la información

Este proyecto se enfoca en desarrollar un sistema automatizado y monitoreado para la fermentación anaeróbica del café, dirigido a pequeños caficultores. Su objetivo es mejorar la calidad del café de manera económica y sostenible, integrando tecnología avanzada con prácticas accesibles. El sistema permite un

control preciso de variables como temperatura, humedad relativa y pH, optimizando la producción y asegurando resultados consistentes. Además, promueve métodos agrícolas más eficientes y ecológicos, contribuyendo al bienestar de los caficultores y al cuidado del medio ambiente.

Las especificaciones incluyen medidas exactas, materiales como acero inoxidable, la cantidad de fruto necesaria y las características físicas y químicas del sistema. El fermentador está diseñado para controlar temperatura, pH y humedad relativa, garantizando eficacia y rendimiento óptimos. Este enfoque asegura que el sistema sea robusto, duradero y mantenga condiciones ideales para la fermentación anaeróbica del café.

Tras una revisión exhaustiva, se concluyó que los sensores adecuados para este proyecto son el sensor de temperatura PT100, el sensor de pH SEN0161 y el sensor de humedad relativa DHT11. Estos fueron seleccionados por su rendimiento, costo y compatibilidad con el proyecto. Junto con sistemas de calibración y monitoreo continuo, estos sensores garantizan el correcto funcionamiento del sistema de fermentación automatizado, mejorando la precisión y eficiencia y asegurando la calidad del producto final.

En resumen, este proyecto proporciona a los pequeños caficultores una solución integral mediante un sistema automatizado para la fermentación anaeróbica del café. La herramienta mejora la calidad del producto y optimiza los procesos agrícolas, promoviendo prácticas sostenibles que benefician tanto la economía como el medio ambiente. Así, los caficultores logran mejorar la calidad del café de manera más eficiente y responsable.

FASE #4. Ingeniería aplicada

Durante esta fase del proyecto, se pone en práctica la formación académica adquirida. Se recopila información de diversos documentos, artículos y sitios web para analizar y determinar las fortalezas y debilidades de diferentes diseños de fermentadores de granos de café.

Esta información es fundamental para la construcción y simulación de un sistema automatizado y monitoreado. El objetivo es estandarizar el proceso de fermentación anaeróbica del café para los pequeños caficultores de Colombia. Para lograr esto, se utilizan varios softwares de simulación, que se describen a continuación:

- **Proteus:** Este software es esencial para desarrollar el circuito eléctrico que integra sensores de temperatura, humedad relativa y pH para monitorear y controlar la fermentación. El circuito incluye una placa Arduino Uno, una pantalla LCD para mostrar datos y un sistema de alarma con señales luminosas y auditivas, todos vitales para el correcto funcionamiento del sistema.
- **Arduino Uno:** El programa es clave para el proyecto, ya que utiliza el lenguaje C para programar la tarjeta Arduino Uno, que coordina los elementos del sistema y gestiona la comunicación entre dispositivos. Su conectividad inalámbrica mejora la automatización y el monitoreo convirtiendo a Arduino en una herramienta versátil para aplicaciones como la domótica y la agricultura inteligente.

En esta fase del proyecto, se requieren habilidades técnicas avanzadas para diseñar y simular un sistema de fermentación de café utilizando Arduino, Proteus y SolidWorks. La simulación integrará estos programas para crear el diseño de la tarjeta y generar un video que evidencie el funcionamiento del sistema, identificando problemas que puedan surgir en diversas condiciones. Este proceso es crucial, ya que permite evaluar el rendimiento en un entorno controlado y optimizar el diseño antes de la implementación física. La capacidad de poder visualizar los datos garantiza que el proyecto cumpla con los estándares de calidad y eficiencia necesarios para el éxito de la fermentación del café.

FASE #5. Validación

En esta etapa del proyecto, se analiza un sistema automatizado de fermentación anaeróbica del café, diseñado para pequeños caficultores en Colombia. El objetivo es optimizar el proceso de fermentación y mejorar la calidad del café, aumentando la eficiencia y la consistencia, y fortaleciendo la competitividad en el mercado global. La integración de tecnología avanzada y prácticas sostenibles busca mejorar la industria cafetalera, beneficiando a productores y consumidores.

El análisis se enfoca en garantizar que los parámetros clave, como temperatura, humedad relativa y pH, se mantengan óptimos para la fermentación del café. Mediante un monitoreo y ajustes precisos, se busca asegurar condiciones ideales que mejoren la calidad y el sabor del café, garantizando resultados consistentes y satisfactorios para los caficultores colombianos.

Para llevar a cabo este proyecto, se emplean diversos programas informáticos especializados que aseguran el correcto funcionamiento del sistema de fermentación. Estos programas permiten un monitoreo continuo de variables como temperatura, humedad relativa y pH. Esto garantiza un proceso de fermentación óptimo, mejorando la calidad del café. Además, la tecnología informática ayuda a gestionar y optimizar los recursos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y rentables para los caficultores en Colombia.

5.3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la implementación del proyecto, se lleva a cabo un análisis detallado y la recolección de datos para abordar los desafíos en la agricultura del café. Se utiliza la plataforma Mendeley para compilar información de documentos académicos y recursos relevantes, lo que permite acceder a conocimientos actualizados y basados en evidencia. Este análisis de datos es fundamental para identificar soluciones efectivas que mejoren las prácticas agrícolas, ayudando a implementar estrategias adaptadas a las necesidades específicas de la producción de café. De esta manera, se promueve la sostenibilidad y la eficiencia en el sector, contribuyendo a un futuro más viable para los caficultores.

Se diseñaron, construyeron y simularon circuitos electrónicos usando un microcontrolador Arduino Uno para monitorizar y automatizar el proceso de fermentación anaeróbica del café. Integrando sensores de temperatura, pH y humedad relativa, el proyecto buscó optimizar este proceso para resaltar los aromas y sabores del café, mejorando así la calidad del producto final. Esta tecnología permite un control preciso y ajustes automáticos beneficiando tanto a productores como a consumidores.

Este proyecto busca beneficiar a los pequeños caficultores, quienes a menudo enfrentan dificultades por la falta de tecnologías avanzadas que aseguren la calidad del café. Al mejorar la calidad del producto, se espera elevar los estándares de vida de la comunidad cafetalera y fortalecer su competitividad en el mercado global. Además, el proyecto promueve prácticas agrícolas sostenibles y eficientes, lo que puede aumentar la rentabilidad a largo plazo. Integrando tecnología y conocimientos especializados, se pretende empoderar a los pequeños productores para que enfrenten con éxito los desafíos del mercado.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Búsqueda de la información

Tras identificar el problema a investigar, se consultaron diversas fuentes, como reportes, artículos técnicos, manuales, revistas especializadas, tesis y documentos en línea, para comprender a fondo los estudios previos exitosos en el área. Esta búsqueda intensiva de información permitió obtener una visión clara de los desafíos que enfrentan los pequeños caficultores y cómo el proyecto puede ofrecer soluciones rápidas y efectivas. Con este enfoque, se busca que los caficultores puedan producir café de calidad de exportación y competir en un mercado premium. En resumen, se realizó una investigación exhaustiva para fundamentar el proyecto en experiencias exitosas previas, garantizando su viabilidad y su potencial para hacer una contribución significativa al sector.

Tabla 7. Búsqueda empleada para el caso de investigación

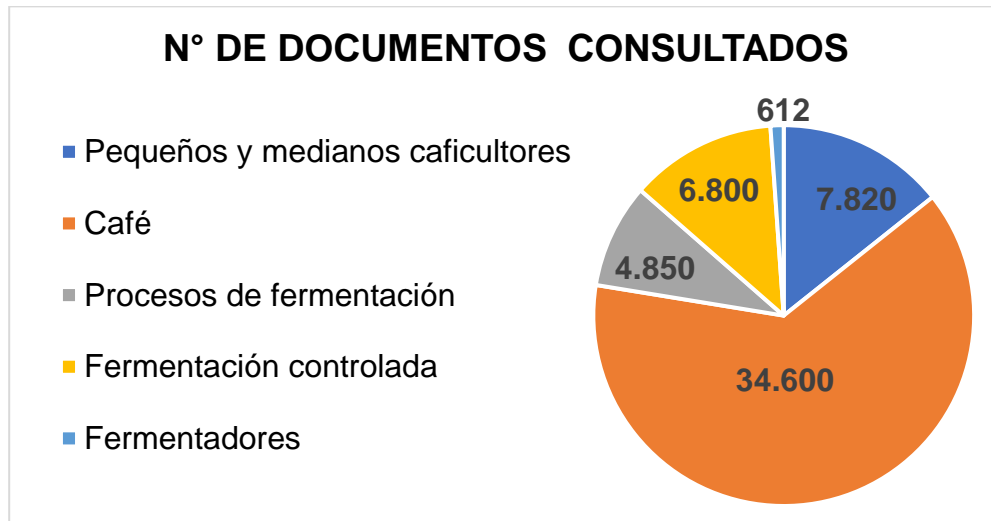
TEMA	N° DE DOCUMENTOS
Pequeños y medianos caficultores	7.820 resultados
Café	34.600 resultados
Procesos de fermentación	4.850 resultados
Fermentación controlada	6.800 resultados
Fermentadores	612 resultados
TOTAL = 54.682 resultados	

Fuente: Propia del autor

Se organizaron y analizaron 54,682 resultados para seleccionar los documentos más relevantes utilizando palabras claves como "pequeños y medianos caficultores", "café", "proceso de fermentación", "fermentación controlada" y "fermentadores". Esta búsqueda exhaustiva es crucial para identificar tendencias y soluciones en la caficultura. El programa Mendeley facilitó la categorización y gestión de documentos, optimizando el tiempo de investigación y mejorando la calidad de los hallazgos. Así, el estudio se fundamenta en una base sólida de

literatura actualizada, respaldando las recomendaciones y decisiones del análisis, lo que contribuye al desarrollo sostenible de la producción de café.

Figura 26. Número de documentos consultados.



Fuente. Propia del autor

La revisión bibliográfica es esencial en la investigación sobre la producción de café, especialmente en áreas complejas. Evaluar tanto la cantidad como la calidad de la información disponible es crucial. Por ejemplo, los estudios sobre pequeños y medianos caficultores ofrecen prácticas sostenibles útiles, mientras que la investigación sobre fermentación controlada revela métodos innovadores para mejorar la calidad del café. Los fermentadores son clave para entender técnicas modernas de producción de café de alta calidad. Focalizarse en estos aspectos ayuda a identificar y contextualizar datos relevantes para avanzar en la investigación.

6.2. Organización de la información

La organización de la información es clave para el éxito de cualquier proyecto científico. Herramientas como Mendeley simplifican la gestión de referencias y facilitan la colaboración entre colegas, asegurando que la información crítica esté bien estructurada y accesible. Usando palabras clave y etiquetas, los investigadores pueden categorizar y recuperar rápidamente datos relevantes, mejorando la eficiencia y reduciendo errores o pérdida de información. Esto asegura que el proyecto se desarrolle de manera precisa y organizada.

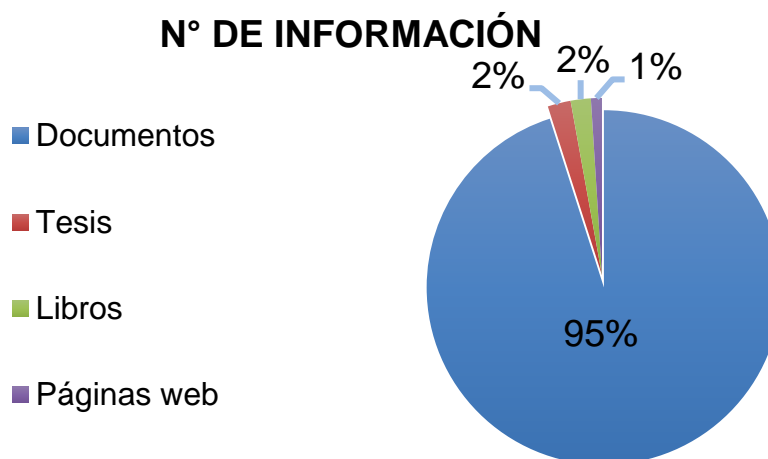
Tabla 8. Información recopilada de diferentes fuentes.

TEMA	N° DE INFORMACIÓN
Documentos	39.522 resultados
Tesis	875 resultados
Libros	764 resultados
Páginas web	416 resultados
TOTAL = 41.577 Resultados	

Fuente: Propia del autor

En la segunda fase de la investigación, se analizó cuantitativamente 41.577 publicaciones de los últimos diez años (2014-2024) sobre temas como pequeños y medianos caficultores, café, y procesos de fermentación. Las publicaciones fueron localizadas usando palabras claves específicas. Los resultados se ilustran en la figura siguiente y ofrecen una visión general de la investigación disponible en este campo.

Figura 27. Organización de la información



Fuente. Propia del autor

La evaluación de los documentos analizados reveló que una gran parte de ellos guarda una relación directa con el tema de investigación abordado. Este análisis detallado no solo permite confirmar la pertinencia de las fuentes, sino que también garantiza que el estudio se fundamenta en información actualizada y relevante. Al establecer esta base sólida, se refuerza la validez de las conclusiones y recomendaciones que se extraen, lo que aporta mayor credibilidad y rigor al trabajo realizado. Esto es esencial para asegurar que las aportaciones del estudio sean significativas y útiles en el contexto del área investigada.

6.3. Análisis de la información

El estudio permite a los productores de café identificar las técnicas más eficientes y sostenibles al analizar diferentes tipos de biorreactores y sus variables. Proporciona una visión integral sobre inversión en tecnología, selección de materiales y la importancia de usar software para monitorear y ajustar el proceso. Esta investigación es crucial para mejorar la calidad del café y la rentabilidad a largo plazo, ayudando a los productores a ofrecer café de alta calidad de manera responsable.

En esta fase, se analizaron diversos biorreactores, variables, equipos, materiales y software a partir de artículos y publicaciones. Los pequeños y medianos productores de café podrán utilizar estos resultados para mejorar la calidad ambiental y económica de sus productos

Tabla 9. Criterios claves de biorreactores

FICHA TÉCNICA DE CRITERIOS CLAVES PARA BIORREACTORES	
CATEGORÍA	DETALLES
Materiales Utilizados	<p>Acero inoxidable: Material resistente y duradero, comúnmente utilizado en la fabricación de biorreactores.</p> <p>Casero en plástico: Biorreactores contruidos con materiales plásticos para aplicaciones específicas.</p>
Modelos de Biorreactores	<p>Ecomill® LH300: Este biorreactor específico está diseñado para aplicaciones concretas en el proceso de fermentación del café, optimizando la interacción de los microorganismos y mejorando la calidad del grano.</p> <p>Eco Mill 3000: Este biorreactor avanzado cuenta con características particulares que permiten un control preciso de las condiciones de fermentación, garantizando una producción de café de alta calidad y consistencia.</p>
Variables Operativas	<p>Tiempo: 10 h - 20 h</p> <p>Temperatura: 10°C - 27°C</p> <p>pH: 3.4 – 4</p>
Equipos de Medición	<p>PT100: Sensor de temperatura para medir la temperatura en biorreactores. Handylab pH 11: Medidor de pH para controlar la acidez o alcalinidad del medio.</p> <p>DHT11: Sensor para medir la humedad y la temperatura en entornos específicos.</p>
Software Utilizado	<p>LABVIEW: Plataforma para desarrollo de sistemas de medición y control.</p> <p>XLSTAT: Software para análisis estadístico y procesamiento de datos.</p> <p>SISVAR: Programa para análisis estadístico y manejo de datos experimentales.</p>

Fuente. Propia del autor

En la tabla se presentan los criterios del análisis de la información, incluyendo materiales utilizados en biorreactores, modelos avanzados, variables operativas clave para la fermentación, equipos de medición de parámetros fisicoquímicos y

softwares gestionados. La selección de estos elementos se basa en una revisión exhaustiva de fuentes especializadas, ofreciendo una referencia clara sobre las decisiones tomadas. Esta información es esencial para evaluar críticamente las metodologías y resultados del estudio, asegurando que el proyecto esté fundamentado en conocimientos actualizados. Al abordar estos aspectos, se busca mejorar la calidad del café y la sostenibilidad del proceso de fermentación, contribuyendo al éxito del proyecto.

6.4. Ingeniería aplicada

La ingeniería en el proyecto de fermentación del café es clave para controlar parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y humedad relativa, garantizando así la calidad del café. Al integrar ingeniería electrónica, mecánica y de software, se desarrolla un sistema que optimiza cada fase del proceso. Esto permite a los caficultores adaptar el proceso a sus necesidades, mejorando su competitividad y sostenibilidad en el mercado, lo cual es esencial para acceder a mercados premium y satisfacer la demanda de cafés de alta calidad.

La ingeniería electrónica y mecánica son fundamentales en el proyecto de fermentación del café. La electrónica permite el muestreo de las señales obtenidas por los sensores para observar los parámetros fisicoquímicos, donde se permite la emulación de circuitos análogos y/o digitales conectadas a un microcontrolador. La mecánica se centra en la estructura y disposición de componentes para crear un ambiente controlado. Esta integración permite ajustes automatizados en temperatura y humedad relativa, garantizando un sistema robusto y mejorando la calidad del café final.

La adopción de innovaciones tecnológicas permite a los pequeños caficultores aumentar su productividad y cumplir con las expectativas del consumidor, accediendo a técnicas antes exclusivas de grandes industrias. Este proyecto busca desarrollar un dispositivo moderno que mejore la calidad del café mediante un microcontrolador ATmega328P programado desde Arduino Uno, capaz de medir temperatura, humedad relativa y pH. Este monitoreo no solo eleva la calidad del café, sino que también fomenta prácticas agrícolas sostenibles, apoyando el desarrollo económico de los caficultores y asegurando un producto competitivo en el mercado premium, donde la calidad y sostenibilidad son fundamentales.

- **Caracterización de parámetros:**

Mantener los parámetros de fermentación del café dentro de rangos óptimos es crucial para mejorar la calidad del producto y desarrollar sabores distintivos, ya que la temperatura, pH y humedad relativa afectan la actividad de las levaduras y bacterias. Un control preciso no solo asegura un proceso homogéneo, sino que también permite a los caficultores experimentar con perfiles de sabor únicos, lo que incrementa su competitividad en el mercado global y les permite posicionarse en un nicho premium con precios más altos.

Tabla 10. Variables fisicoquímicas

PARÁMETRO	RANGO IDEAL	OBSERVACIONES
Temperatura Interna	25°C - 30°C	Ideal para la actividad metabólica óptima de levaduras y bacterias durante la fermentación.
Temperatura Ambiente	18°C - 30°C	Varía según la altitud y la cepa de café. Asegura una fermentación eficiente
Humedad	40% - 70%	Ajustar según las condiciones climáticas locales para mantener la integridad del grano.
Ph	3 – 6	Medir regularmente durante la fermentación para controlar la actividad microbiana y el desarrollo de sabores.

Fuente. Propia del autor

Para una fermentación óptima en la producción de café, es crucial mantener la temperatura interna entre 25°C y 30°C, ya que este rango favorece la actividad de levaduras y bacterias, esenciales para descomponer azúcares y generar aromas distintivos. Un manejo inadecuado de esta temperatura puede resultar en un sabor insatisfactorio.

La temperatura ambiente debe mantenerse entre 18°C y 30°C, variando según la altitud y la cepa de café. Este control es esencial para una fermentación eficiente, lo que permite a los productores maximizar el potencial de cada cosecha y desarrollar sabores y aromas específicos en el café.

La humedad relativa debe mantenerse entre el 40% y el 70%, ajustándose a las condiciones climáticas locales para preservar la calidad del grano y prevenir mohos. Un control inadecuado de la humedad relativa puede resultar en pérdidas significativas en la calidad del café, por lo que es vital durante la fermentación.

El pH debe estar entre 3 y 6, y su medición regular es crucial para controlar la actividad microbiana y potenciar los sabores del café. Un pH inadecuado puede afectar la complejidad del producto final, comprometiendo su calidad.

Además, estas herramientas ayudan a los productores a experimentar con diferentes variables, promoviendo una producción más consistente y de alta calidad. Al integrar ciencia y tecnología en la fermentación, se pretende no solo mejorar el café, sino establecer nuevos estándares en la producción sostenible de esta valiosa industria.

El control de los parámetros fisicoquímicos es esencial para optimizar la fermentación del café, y los programas de simulación juegan un papel clave en este proceso. Estas herramientas permiten modelar y predecir el impacto de variaciones en temperatura, humedad relativa y pH, facilitando los ajustes necesarios y promoviendo una producción más consistente y de alta calidad.

Implementar un control sistemático de factores como temperatura, humedad relativa y pH durante la fermentación mejora la calidad del café y resalta sabores únicos, diferenciando el producto en un mercado competitivo. Este proyecto optimiza la fermentación y eleva los estándares de producción mediante ciencia y tecnología, permitiendo a los caficultores monitorear condiciones con precisión. Como resultado, se obtiene un café de mayor calidad y se facilita el acceso a mercados premium, beneficiando la sostenibilidad económica de la industria cafetera

Si desea obtener información más clara sobre los componentes utilizados en el proyecto y sus costos, puede consultar el Anexo F. Allí se presenta una figura con la lista de materiales necesarios para construir la tarjeta madre, incluyendo sus referencias y precios en pesos colombianos. El costo total es de 200.900,00 COP,

lo que la hace más económica y accesible en comparación con otros fermentadores del mercado.

El Anexo F ofrece recursos visuales y documentales clave para facilitar la comprensión e implementación del proyecto, incluyendo diagramas y detalles sobre el diseño del fermentador. Esta información permite a los pequeños caficultores optimizar la calidad de sus productos, mejorar su situación económica y competir eficazmente en el mercado, contribuyendo así al desarrollo sostenible de sus comunidades.

Se utilizaron tres programas fundamentales: Proteus, Arduino y SolidWorks, para diseñar un sistema automatizado y monitoreado de fermentación anaeróbica que controle parámetros fisicoquímicos como temperatura, humedad y pH. Estos programas ayudan a identificar claramente cada etapa del proceso, permitiendo a los caficultores convertir la simulación en una aplicación real, creando sistemas eficientes y tomando decisiones informadas. Esta tecnología no solo mejora la calidad y competitividad del café, sino que también proporciona beneficios económicos a los productores y favorece el reconocimiento del café colombiano en el mercado global, impulsando un desarrollo sostenible en sus comunidades.

6.4.1. Diseño electrónico

El diseño electrónico del proyecto de fermentación del café es fundamental para el control preciso de parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y humedad relativa, que son cruciales para la calidad del producto. Una gestión adecuada de estos factores es esencial para evitar variaciones indeseadas en el sabor y aroma del café.

El software de simulación Proteus es una herramienta clave para diseñar y simular circuitos electrónicos de manera intuitiva. Su capacidad para modelar componentes como resistencias y microcontroladores facilitó la creación y validación de la parte eléctrica del fermentador, garantizando un diseño efectivo.

Una de las principales ventajas de Proteus es su capacidad para detectar y corregir fallos antes de la implementación física, lo que evita problemas en el funcionamiento del sistema. Además, su entorno facilita la integración del código de programación con el diseño electrónico, asegurando que el microcontrolador Arduino Uno funcione correctamente y optimizando así el proceso de diseño.

Se integró el programa Arduino para codificar la funcionalidad de la tarjeta madre del proyecto, empleando el microcontrolador Arduino Uno, que es altamente versátil y se adapta a las necesidades del sistema. Su entorno de desarrollo, que incluye el software Arduino IDE, facilita la escritura y carga de código, permitiendo a los desarrolladores implementar rápidamente nuevas funciones de control y realizar pruebas eficaces.

Utilizando Arduino, programado en C/C++, se desarrolló el código base esencial que garantiza el funcionamiento óptimo de la tarjeta madre y del proyecto en su conjunto. Este código me permite controlar parámetros fisicoquímicos cruciales, como la temperatura, la humedad y el pH, facilitando una monitorización continua y una respuesta efectiva ante cualquier variación.

La integración de los programas de simulación Proteus y Arduino es fundamental para garantizar la viabilidad del proyecto de fermentación de café, asegurando que funcione de manera adecuada. Utilizo Proteus para diseñar y validar circuitos electrónicos, mientras que Arduino, programado en C/C++, permite controlar parámetros críticos. Esta combinación favorece métodos de fermentación más eficientes y mejora la producción de café de alta calidad.

Se selecciono cuidadosamente los materiales para el proyecto de fermentación de café, asegurando su durabilidad, costo y funcionamiento. Se construyo y verifico los componentes del fermentador, incluidos sensores de temperatura, pH, humedad y sistemas de alarma. Utilicé el programa de simulación Proteus para diseñar y ajustar los circuitos, lo que permite validar el funcionamiento del sistema junto con el programa Arduino. El objetivo principal es mejorar la calidad del café y optimizar el proceso de fermentación, garantizando resultados consistentes que cumplan con las expectativas del mercado.

Tabla 11. Componentes del circuito del fermentador

COMPONENTE	VARIABLE	RANGO IDEAL	REFERENCIA
Sensores			
Sensor de temperatura interna	Temperatura interna	25°C - 30°C	Sensor PT100: Ideal para la actividad metabólica óptima de levaduras y bacterias.
Sensor de temperatura ambiente y humedad	Temperatura ambiente	18°C - 30°C	Sensor DHT11: Varía según la altitud y la cepa de café, asegurando una fermentación eficiente.
Sensor de temperatura ambiente y humedad	Humedad	40% - 70%	Sensor DHT11: Ajustar según condiciones climáticas locales para mantener la integridad del grano.

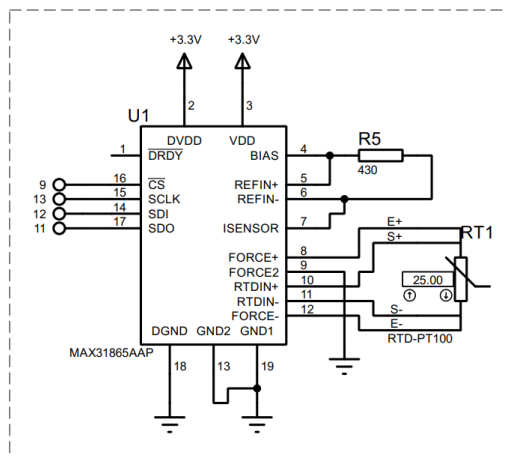
Sensor de pH	pH	3 – 6	Medir regularmente durante la fermentación para controlar la actividad microbiana y el desarrollo de sabores.
Control y Monitoreo			
Placa de control	Microcontrolador	N/A	Arduino Uno con microcontrolador ATmega328P.
Visualizador	Pantalla	N/A	Pantalla LCD: Permite mostrar datos de temperatura, pH y humedad.
Comunicación usuario-máquina	Terminal	N/A	Terminal virtual: Facilita la interacción y el control del sistema.
Sistemas			
Sistema de refrigeración y alarma	Alarma y refrigeración	N/A	Sistema de alarma lumínica y sonora, y sistema de refrigeración para mantener condiciones óptimas.
Diseño			
Esquema electrónico propuesto para fermentador	Diseño del sistema	N/A	Esquema electrónico con componentes esenciales para control preciso y eficiente de la fermentación.

Fuente. Propia del autor

- **Sensor de temperatura interna**

El sensor PT100 es esencial para mi proyecto, ya que mide la temperatura con una alta precisión de ± 0.1 °C al detectar cambios en la resistencia de un alambre de platino. Su protección en un cuerpo cerámico o tubo de acero inoxidable garantiza durabilidad y confiabilidad en un amplio rango térmico. Mantiene la temperatura del fermentador de café entre 25 °C y 30 °C, favoreciendo la actividad metabólica de levaduras y bacterias, cruciales para una fermentación exitosa y un producto final de alta calidad.

Figura 28.Sensor PT100



Sensor PT100

Fuente. Propia del autor

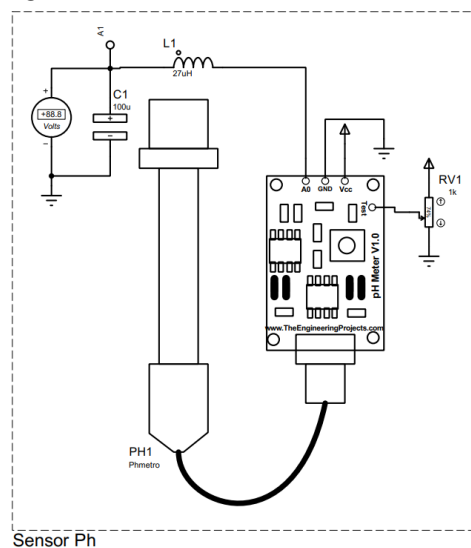
La figura 28 muestra la configuración del sensor PT100 con el módulo MAX31865AAP, utilizado para el control y monitoreo preciso de la temperatura interna durante la fermentación del café. Esto optimiza la eficiencia y mejora la calidad del producto final, permitiendo el desarrollo de perfiles de sabor más complejos y estableciendo altos estándares en la producción de café, lo que asegura una producción constante en un mercado competitivo.

El MAX31865AAP es fundamental para el funcionamiento del sensor PT100 en mi proyecto de fermentación de café, ya que convierte las señales de resistencia en lecturas digitales precisas. Su diseño optimizado mejora la exactitud y filtra el ruido, lo que permite mantener la temperatura del fermentador entre 25 °C y 30 °C, ideal para la actividad metabólica de levaduras y bacterias. Sin el MAX31865AAP, el control y monitoreo del sensor serían menos eficientes, comprometiendo así la calidad y consistencia del café producido.

- **Sensor de pH metro SEN0161**

Un sensor de pH es fundamental para medir la acidez o alcalinidad de una solución, utilizando electrodos que detectan cambios en la concentración de iones de hidrógeno. En el contexto de este proyecto, se emplea un pHmetro para mantener el pH del fermentador de café entre 3 y 6, un rango crítico para optimizar el proceso de fermentación.

Figura 29. Sensor SEN0161



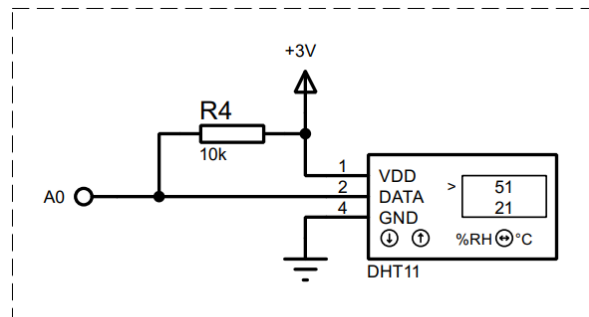
Fuente. Propia del autor

Mantener el pH en un rango adecuado es fundamental para una fermentación eficiente y para realzar el sabor y aroma del café. El sensor SEN0161 es crucial, ya que mide con precisión los niveles de pH, permitiendo a los productores obtener un producto final de alta calidad en un mercado que valora la excelencia. Al integrar este sensor, el proyecto busca elevar los estándares de calidad y consistencia en la industria cafetera, beneficiando tanto a productores como a consumidores y generando lealtad en los clientes.

- **Sensor de temperatura ambiente y humedad**

El sensor DHT11 es fundamental en este proyecto, ya que mide con precisión la temperatura y la humedad a través de un sensor capacitivo y un termistor. Su integración con microcontroladores permite un monitoreo continuo esencial para gestionar los parámetros fisicoquímicos durante la fermentación del café. Al mantener condiciones óptimas, el DHT11 mejora la eficiencia del proceso y la calidad del café, ayudando a cumplir con los estándares exigidos en un mercado competitivo.

Figura 30.Sensor DHT11



Sensor DHT11

Fuente. Propia del autor

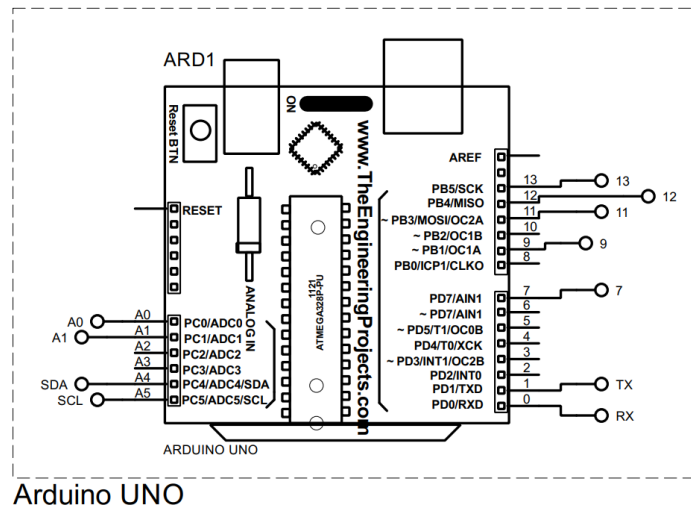
En este contexto, el DHT11 se utiliza para mantener la temperatura del fermentador entre 18°C y 30°C, así como la humedad relativa entre 40% y 70%. Estas condiciones son vitales para asegurar una fermentación eficiente, ya que influyen directamente en la actividad de levaduras y bacterias, responsables del desarrollo de sabores y aromas en el café.

Estas condiciones afectan la actividad de las levaduras y bacterias, mejorando así el sabor y la calidad del café. Por lo tanto, el DHT11 es esencial para asegurar un café de alta calidad y una producción consistente.

- **Placa de control**

La placa de control utilizada en este proyecto es el Arduino Uno, que incorpora el microcontrolador ATmega328P. Esta placa es altamente valorada en el ámbito de la electrónica debido a su versatilidad y facilidad de uso. Con 14 pines digitales y 6 pines analógicos, así como conectividad inalámbrica, el Arduino Uno se adapta perfectamente a las necesidades de un proyecto de control de parámetros fisicoquímicos.

Figura 31. Arduino uno



Arduino UNO

Fuente. Propia del autor

El Arduino Uno es esencial en el proceso de fermentación del café, ya que gestiona la comunicación entre sensores y actuadores. Su capacidad para analizar y visualizar los datos garantiza que todos los componentes trabajen de manera sincronizada, lo que es crucial para mantener condiciones óptimas. Esto no solo mejora la calidad del café, sino que también permite ajustes rápidos en respuesta a las mediciones, optimizando continuamente el proceso de producción.

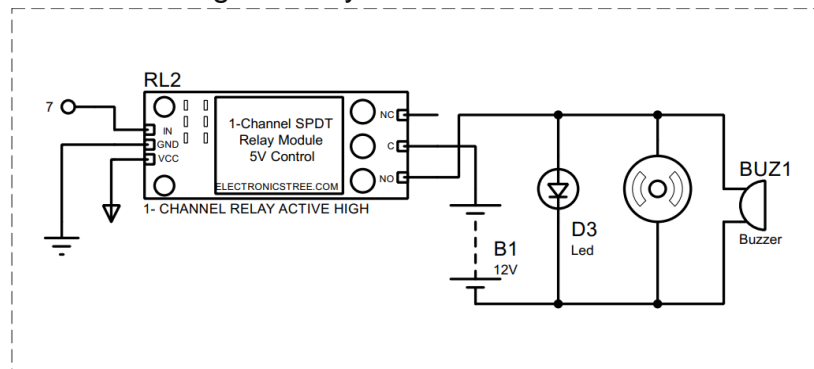
El Arduino Uno permite un control remoto efectivo, lo que permite a los productores ajustar las condiciones de fermentación según las necesidades de cada lote. Esto optimiza el proceso y asegura que los parámetros fisicoquímicos se

mantengan dentro de los rangos ideales, elevando así los estándares de calidad en la producción cafetera.

- **Sistema de refrigeración y alarma**

El sistema de alarma está diseñado para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de los sensores en el proceso de fermentación. Consta de una alarma sonora y visual que se activa de inmediato al detectar desviaciones de los parámetros aceptables, emitiendo un sonido intenso y luz intermitente para alertar al personal. Además, incluye un sistema de refrigeración motorizado que ayuda a regular la temperatura y prevenir sobrecalentamientos, optimizando así el proceso y asegurando la calidad del producto final. Esta combinación de medidas proporciona una red de protección eficaz y tranquilidad para los operarios.

Figura 32. Sistema de refrigeración y alarma



Sistema de refrigeración & alarma

Fuente. Propia del autor

Esta señal de emergencia es crucial para tomar decisiones rápidas y efectivas en situaciones potencialmente peligrosas. Paralelamente, el sistema de refrigeración trabaja en conjunto para mantener un ambiente controlado. Cuando la temperatura supera los límites preestablecidos, el sistema ajusta automáticamente el flujo de refrigerante.

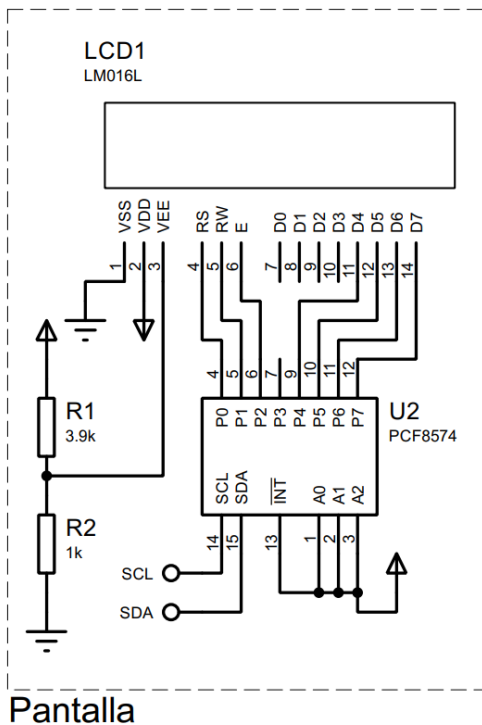
El motor del sistema de refrigeración se activa de inmediato para iniciar el enfriamiento, garantizando que la temperatura regrese a niveles seguros y evitando daños a los equipos. La combinación de alertas sonoras y visuales, junto con ajustes automáticos, permite una respuesta rápida ante anomalías, manteniendo los parámetros fisicoquímicos dentro del rango óptimo para asegurar una fermentación

de alta calidad. Esto crea un entorno controlado y seguro, esencial para maximizar la calidad del café producido.

- **Visualizador**

La pantalla LCD es conocida por su capacidad para mostrar imágenes y texto con gran claridad, lo que la hace una opción popular en muchos dispositivos electrónicos. Su alta calidad de visualización ofrece una experiencia óptima y un uso prolongado sin un consumo excesivo de electricidad. Esta combinación de características no solo mejora la usabilidad, sino que también contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de costos operativos.

Figura 33. Pantalla LCD



Fuente. Propia del autor

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, las pantallas LCD presentan algunas limitaciones, como ángulos de visión reducidos. Esto significa que la calidad de la imagen puede deteriorarse si se observa desde posiciones no frontales. Además, en comparación con otras tecnologías de visualización, como las pantallas OLED, el contraste en las pantallas LCD suele ser menor, lo que puede afectar la profundidad y el dinamismo de las imágenes.

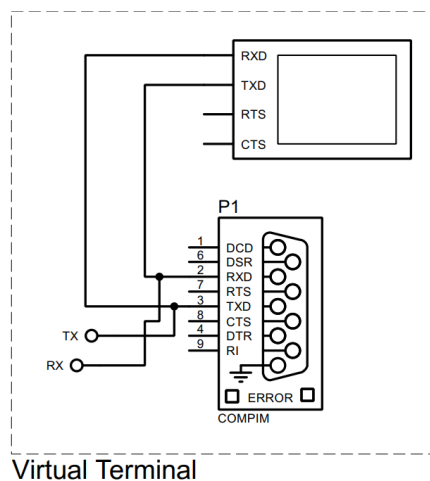
A pesar de estas desventajas, el bajo consumo de energía de las pantallas LCD las hace ideales para su uso en una amplia gama de dispositivos, incluyendo televisores, computadoras y teléfonos móviles, donde la eficiencia y la duración de la batería son factores cruciales para los usuarios.

En este proyecto, se utiliza la pantalla LCD para visualizar y registrar datos de sensores fisicoquímicos en un fermentador de café, midiendo parámetros clave como temperatura, humedad y pH. Su implementación es crucial para el seguimiento y control preciso del proceso de fermentación.

- **Comunicación usuario máquina**

Un terminal virtual diseñado para registrar los parámetros fisicoquímicos del café, tales como temperatura, humedad y pH, proporciona una herramienta valiosa para el monitoreo continuo de estos datos. Esta capacidad de seguimiento permite a los productores y comerciantes acceder a la información crítica desde cualquier lugar, lo que mejora significativamente la gestión de la calidad del café en todas las etapas de producción.

Figura 34.Virtual terminal



Fuente. Propia del autor

Los usuarios pueden visualizar y controlar las lecturas de los sensores esenciales para garantizar la calidad del café. Esta interfaz intuitiva facilita la interpretación de los datos y permite realizar ajustes inmediatos en los procesos. Al identificar desviaciones en los parámetros establecidos, los usuarios pueden tomar

decisiones informadas para corregir problemas antes de que afecten el producto final. Esto asegura que cada lote de café cumpla con las expectativas del consumidor y fortalece la reputación de los productores en un mercado exigente.

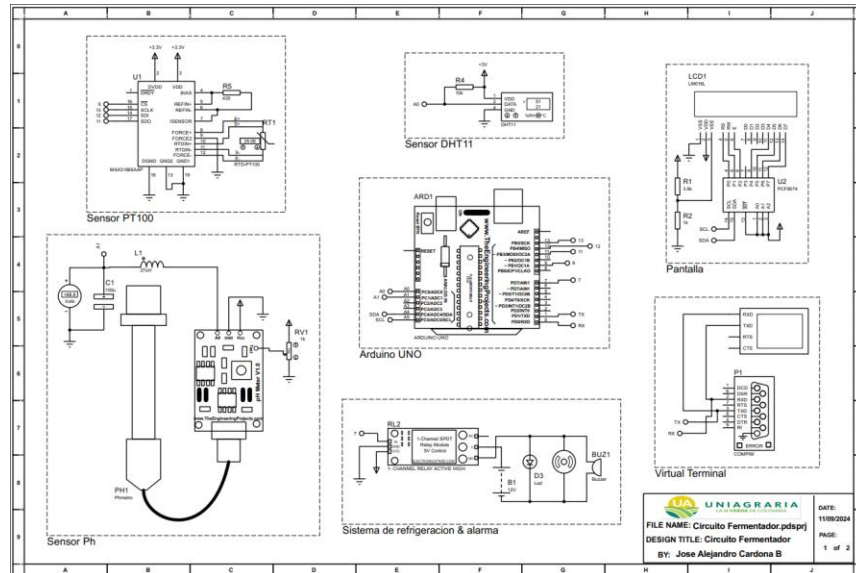
La capacidad de monitorear parámetros clave optimiza la producción al mantener condiciones ideales para el cultivo y procesamiento del café. Esto mejora la calidad del producto final, potencia la eficiencia operativa y reduce costos. Por lo tanto, invertir en este sistema se convierte en una decisión estratégica para cualquier negocio relacionado con el café, fortaleciendo su competitividad en el mercado.

Después de realizar exhaustivas pruebas y simulaciones con Proteus y Arduino, se ensambló el circuito para el fermentador, diseñado para monitorear parámetros fisicoquímicos del café, como temperatura, pH y humedad. La simulación en Proteus confirmó el correcto funcionamiento del circuito y aseguró que cumple con todas las especificaciones técnicas necesarias. Esta validación es crucial para garantizar una operación eficiente y precisa en la fermentación del café.

- **Esquema electrónico propuesta fermentador**

El esquema electrónico del fermentador incluye componentes esenciales que aseguran un control preciso del proceso de fermentación. Utiliza sensores clave, como uno de temperatura que monitorea el líquido y uno de pH que mide la acidez, así como opcionalmente un sensor de humedad para controlar las condiciones ambientales. Esta integración permite ajustes automáticos, garantizando la calidad del café y optimizando la eficiencia operativa.

Figura 35. Circuito Fermentador



Fuente. Propia del autor

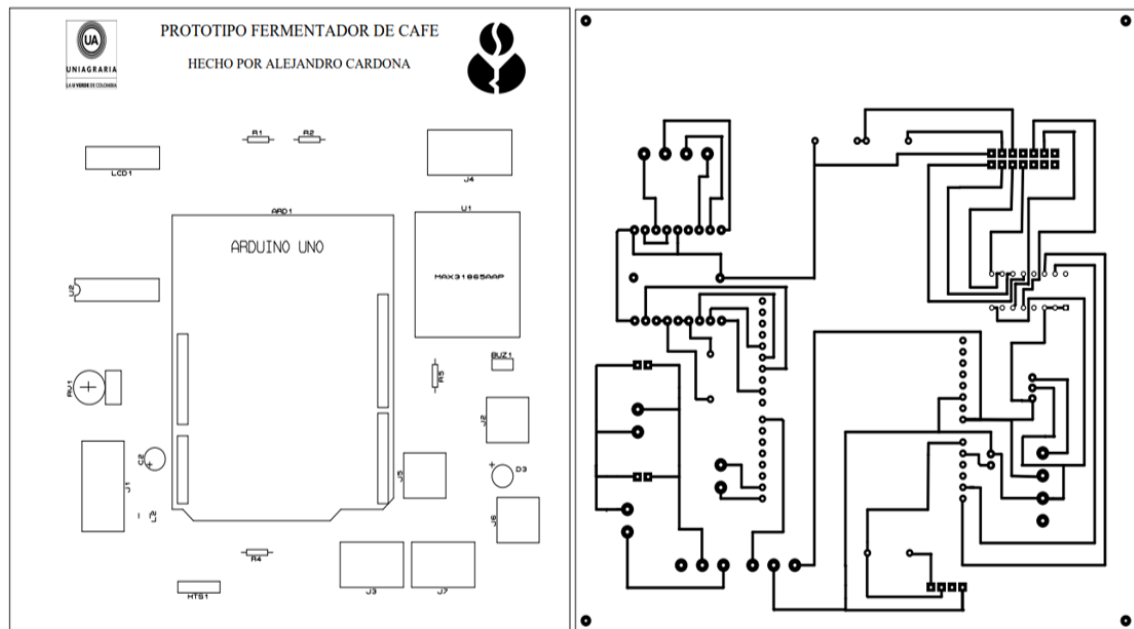
La figura presenta los componentes de la tarjeta del fermentador de café, que incluye sensores importantes como el PT100 (temperatura), el SEN0161 (pH) y el DHT11 (humedad), junto con la tarjeta Arduino Uno y una pantalla LCD. La interfaz es fácil de usar, permitiendo a los usuarios monitorear parámetros críticos. Esto ayuda a entender mejor el proceso y a adaptarse a las necesidades específicas. Esta funcionalidad es clave para optimizar la fermentación del café, garantizando condiciones ideales y una alta calidad en el producto final.

El sistema de alarma emite señales sonoras y visuales si los parámetros se desvían de los límites, alertando al usuario para que tome medidas inmediatas. Los sensores envían datos al microcontrolador, que activa los actuadores ante condiciones anómalas. Esto permite un monitoreo eficiente y empodera a los usuarios para optimizar el proceso de fermentación y garantizar un producto de alta calidad.

En la figura 36 A se pueden observar los componentes de la tarjeta del fermentador de café, que incluyen sensores de temperatura, humedad y pH, así como otros elementos electrónicos esenciales. La figura 36 B muestra las conexiones en la placa de circuito impreso (PCB), que facilitan la comunicación entre estos componentes. Esta tarjeta es fundamental para el proyecto de automatización y monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del café, actuando como el núcleo del sistema al integrar todos los sensores y dispositivos necesarios.

Su correcta implementación permite a los caficultores recolectar datos y ajustar las condiciones de fermentación, optimizando así la temperatura, la humedad y el pH para lograr un café de mayor calidad.

Figura 36.componentes y conexiones de la tarjeta



(a) Tarjeta de componentes

(b) conexiones de la tarjeta

Fuente. Propia del autor

Imprimir una placa de circuito impreso (PCB) diseñada en software como Proteus implica seguir pasos cuidadosos. Primero, se crea el circuito y se verifica que todos los componentes estén correctamente conectados. Luego, se genera el archivo de salida para la fabricación y se imprime el diseño en espejo sobre papel de transferencia con una impresora láser, asegurando una adecuada transferencia a la placa de cobre, generalmente de material FR-4. Es fundamental limpiar la placa antes de colocar el papel para eliminar oxidación e impurezas. La correcta fabricación de la PCB es crucial para el sistema de fermentación, permitiendo un control preciso de los parámetros que afectan la calidad del café y mejorando la producción para los caficultores.

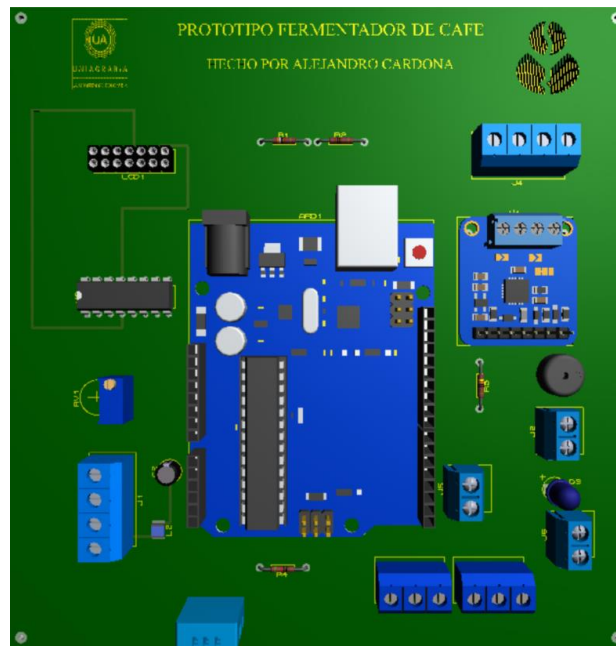
Una vez que se haya completado y verificado el funcionamiento del circuito del fermentador de café en Proteus y el código en Arduino, y se haya recopilado la documentación en fotos, videos y otra información, se procederá a diseñar la tarjeta madre en 3D. Este diseño en 3D incluirá todas las conexiones y componentes

esenciales, como los sensores de temperatura, humedad y pH, así como el sistema de alarma visual y sonora y el motor de refrigeración.

El diseño busca ofrecer una representación visual detallada de la tarjeta simulada, ayudando a los pequeños caficultores a comprender el ensamblaje final. La figura 37 muestra una visualización en 3D de la placa principal, permitiendo a los caficultores ver la interconexión de los componentes. Esta visualización es crucial, ya que ilustra cómo cada elemento contribuye al control de los parámetros fisicoquímicos durante la fermentación del café, lo que les permitirá optimizar sus procesos y mejorar la calidad del producto final.

Este control es vital para optimizar el proceso, ya que el monitoreo preciso de la temperatura, el pH y la humedad tiene un impacto directo en la calidad del café producido. Además, al utilizar diferentes programas de simulación, se podrán realizar ajustes y mejoras antes de la implementación real, garantizando así que el sistema sea eficiente y funcional en el contexto de la producción cafetera.

Figura 37. Tarjeta fermentadora de café



Fuente. Propia del autor

El diseño de la tarjeta en 3D en Proteus es fundamental para el éxito del proyecto de fermentación del café, ya que permite visualizar y optimizar el control de parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y humedad. Para iniciarlo, es

necesario crear un nuevo proyecto y seleccionar cuidadosamente los componentes desde la librería, asegurando que cada elemento cumpla una función específica en el proceso de fermentación.

Activar el modo 3D en Proteus permite visualizar el proyecto, facilitando la disposición de los componentes y su identificación durante el ensamblaje. La simulación del fermentador anaeróbico, que monitorea pH, temperatura y humedad, es clave para que los pequeños caficultores mejoren la calidad de su café. Además, ayuda a detectar errores antes de la fabricación, optimizando así el rendimiento del sistema y asegurando la competitividad en el mercado.

Optimizar factores como el pH, la temperatura y la humedad durante la fermentación del café mejora la calidad del producto y potencia la rentabilidad y sostenibilidad de la producción. Un café de alta calidad atrae más consumidores, lo que beneficia a los caficultores. Para más información sobre el uso de Proteus en este proyecto, se pueden consultar detalles adicionales.

6.4.2. Diseño mecánico

El sistema mecánico del fermentador de café debe facilitar la instalación y el mantenimiento, incluyendo soportes para sensores y un eficiente sistema de refrigeración. La integración con sistemas de control electrónico, como los simulados en Proteus y Arduino, permite ajustes automáticos y optimizar el proceso de fermentación.

El diseño estético del fermentador es crucial para los caficultores que buscan presentar un producto atractivo y de alta calidad. Un diseño mecánico robusto y funcional no solo optimiza parámetros fisicoquímicos, sino que también mejora la calidad del café, abriendo oportunidades en mercados más amplios.

La plataforma SolidWorks® es crucial para el desarrollo del fermentador artesanal de café, ya que permite a los caficultores visualizar y comprender su implementación. Este sistema monitorea parámetros fisicoquímicos como temperatura, humedad y pH, facilitando ajustes inmediatos y decisiones informadas. Al optimizar el proceso de fermentación, se mejora la calidad del café y se promueven prácticas más eficientes y sostenibles, lo que aumenta la competitividad en el mercado y beneficia tanto a los productores como a los consumidores.

Además, al optimizar estos procesos, se preservan las características organolépticas del café, que son esenciales para satisfacer las expectativas de los consumidores en mercados locales e internacionales. Esto no solo contribuye a la calidad del producto, sino que también fortalece la competitividad de los caficultores en el mercado.

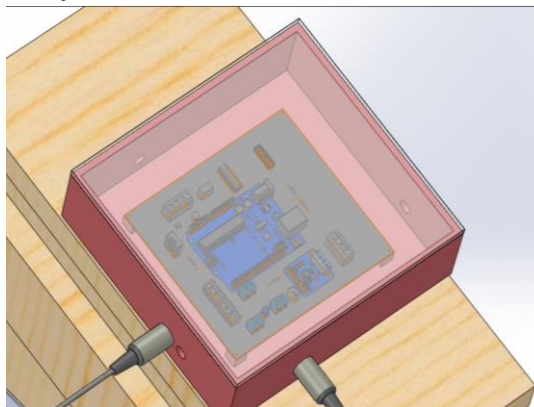
El acceso a herramientas tecnológicas como SolidWorks® permite a los pequeños caficultores competir en un mercado global, incrementando la productividad y la calidad del café. Esta incorporación de tecnologías avanzadas fortalece su posición en un entorno competitivo y fomenta prácticas agrícolas más sostenibles.

SolidWorks® facilita un monitoreo eficaz de los recursos, minimizando el desperdicio y utilizando insumos de manera más eficiente, lo que reduce el impacto ambiental. Así, la integración de estas tecnologías no solo beneficia económicamente a los caficultores, sino que también mejora la calidad de vida en las comunidades cafetaleras y promueve la salud del ecosistema local.

- **tarjeta electrónica**

A continuación se presenta la tarjeta electrónica diseñada con Proteus, que incluye el esquema eléctrico y el código programado en Arduino. Además, se ha elaborado una caja protectora que resguarda la tarjeta de posibles daños físicos y mejora la estética del dispositivo. Este diseño permite una mejor visualización y acceso a las conexiones, aspectos clave para su manipulación y mantenimiento.

Figura 38. Diseño de la tarjeta electrónica



Fuente. Propia del autor

La caja fue diseñada en SolidWorks®, utilizando plástico de alta resistencia para el cuerpo y acetato para la tapa. Este material ofrece una barrera efectiva contra el polvo y permite observar el interior sin abrirla, lo que facilita el monitoreo de los componentes y garantiza la durabilidad del dispositivo.

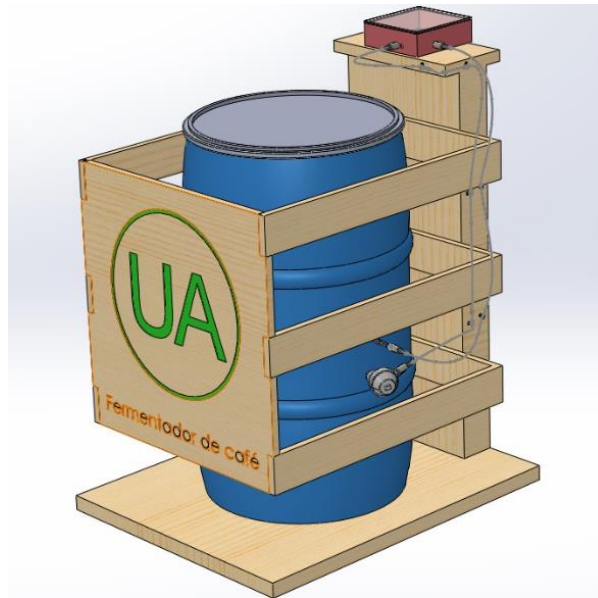
La integración de la tarjeta electrónica, el diseño de la caja y la selección de materiales es crucial para el éxito del proyecto de fermentación del café. Este enfoque permite un monitoreo preciso de parámetros clave, como temperatura, pH y humedad, mejorando la eficiencia del sistema. Como se muestra en la figura siguiente, la caja está situada sobre la base, garantizando condiciones óptimas para la fermentación. Los materiales elegidos fueron cuidadosamente analizados por su costo y beneficios, maximizando así la funcionalidad del sistema. De este modo, se asegura un café de alta calidad y se promueve una inversión valiosa para los caficultores.

- **CAD de propuesta del fermentador**

La imagen presenta una propuesta de fermentador artesanal de café, diseñado específicamente para pequeños caficultores. Este dispositivo facilita la integración de la tarjeta electrónica, optimizando los resultados del proceso de fermentación.

Cada componente del proyecto se ha seleccionado por su funcionalidad y durabilidad. La caja que protege la tarjeta electrónica es de plástico, cumpliendo con la norma IP65, que asegura protección contra el polvo y chorros de agua, vital en un entorno de fermentación. La tapa de acrílico facilita la visualización de los componentes internos, mientras que el barril y su tapa de plástico ofrecen resistencia a la humedad. La estructura de madera proporciona estabilidad y un atractivo estético, asegurando que el fermentador sea tanto funcional como visualmente atractivo para los caficultores.

Figura 39.Propuesta del fermentador



Fuente. Propia del autor

El sistema de fermentación anaeróbica, diseñado para pequeños caficultores, automatiza y monitorea parámetros cruciales como la temperatura, el pH y la humedad del café. Fabricado con materiales específicos, permite un seguimiento continuo y preciso, optimizando las condiciones de fermentación y garantizando una mayor consistencia en la calidad del producto. Esto no solo reduce la carga de trabajo del caficultor, sino que también minimiza el riesgo de defectos, lo que se traduce en mayores ingresos y promueve prácticas agrícolas sostenibles, fortaleciendo así la producción cafetalera.

Cada parte del sistema está diseñada para adaptarse perfectamente al barril de café, lo que asegura una integración eficiente. Esta correcta implementación del fermentador mejora el proceso de fermentación para los pequeños caficultores, elevando la calidad del café y generando beneficios económicos y ambientales. Al optimizar el control de parámetros fisicoquímicos, el sistema garantiza un producto final que cumple con las expectativas de caficultores y consumidores, contribuyendo así al éxito y la sostenibilidad de la producción cafetalera.

Este enfoque integral no solo mejora la calidad del café producido, sino que también empodera a los caficultores al proporcionarles herramientas prácticas y accesibles que les permiten experimentar y ajustar el proceso de fermentación. De esta manera, los pequeños caficultores pueden obtener un producto final de alta

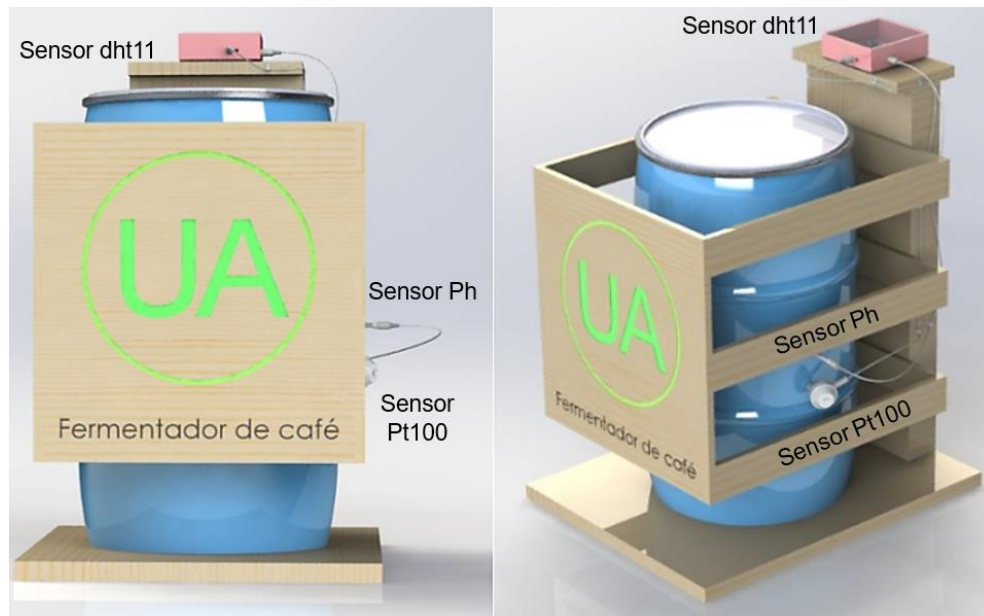
calidad, fomentando su autonomía y contribuyendo al desarrollo sostenible de la industria cafetera local.

- **Renderizado de la propuesta del fermentador**

En esta sección se presenta el renderizado del fermentador de café, diseñado para que los pequeños caficultores comprendan cómo adaptar y colocar la tarjeta eléctrica y los materiales necesarios. Este diseño ilustra la disposición de la tarjeta y detalla la estructura del fermentador, garantizando un funcionamiento óptimo y eficiente, aspectos esenciales para el éxito del proceso de fermentación.

La visualización de la integración de los componentes ayuda a los caficultores a comprender y aplicar el sistema. El diseño del fermentador, junto con materiales seleccionados, permite un control preciso de parámetros fisicoquímicos esenciales como la temperatura, el pH y la humedad, optimizando la fermentación y la calidad del café. Esto mejora la producción y promueve la sostenibilidad y el crecimiento económico de los pequeños productores.

Figura 40. Renderizado del fermentador



(a) Vista frontal.

(b) vista isométrica

Fuente. Propia del autor

La figura muestra claramente la ubicación estratégica de tres sensores esenciales: uno para medir la temperatura (Pt100), otro para la humedad (DHT11) y un tercero para el pH (SEN0161). Esta disposición cuidadosa facilita un monitoreo

efectivo y una automatización precisa del proceso de fermentación. De este modo, los caficultores pueden ajustar los parámetros fisicoquímicos garantizando un desarrollo óptimo del café.

La automatización y el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos, como la temperatura (Pt100), la humedad (DHT11) y el pH (SEN0161), durante la producción de café, garantizan no solo la calidad superior del producto, sino también un aumento significativo en la productividad de los caficultores. Este aumento en la eficiencia fortalece la competitividad en el mercado. Además, este enfoque innovador impulsa la sostenibilidad y el crecimiento del sector cafetero, brindando a los pequeños productores herramientas que les permiten mejorar sus condiciones económicas. De esta manera, se establece un ciclo positivo que beneficia tanto a los caficultores como a toda la industria en general.

6.4.3. Diseño computacional

El diseño computacional del sistema de fermentación de café es vital para los pequeños caficultores colombianos, ya que mejora la calidad del café mediante la automatización y el monitoreo de parámetros clave. Esto optimiza las condiciones para los microorganismos responsables del sabor y fortalece la competitividad del café colombiano en el mercado internacional.

La implementación de herramientas como Arduino, Proteus y SolidWorks proporciona a los pequeños caficultores soluciones para mejorar sus productos a través del diseño y simulación de circuitos. Estas herramientas permiten un análisis digital que optimiza las prácticas agrícolas y aumenta la productividad. Así, los caficultores pueden satisfacer mejor a los consumidores y promover la sostenibilidad. Además, el proyecto incluye el desarrollo de un dispositivo con un microcontrolador Arduino Uno para medir factores críticos que afectan la calidad del café.

Este proyecto aplicará los conocimientos del diplomado de bioprocesos para entender mejor la fermentación y el uso de biorreactores, lo que ayudará a los caficultores a gestionar la producción de café de manera más eficiente. Al diseñar circuitos que midan factores claves, se mejorará la recolección de datos y se optimizarán los procesos, elevando así la calidad del café. Además, se promoverá el desarrollo sostenible de las comunidades cafetaleras, generando un impacto positivo en su economía y bienestar social.

Figura 41. Fragmento del código

```
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>

#define SensorPin A1

int sistemaAlarmaRefrigeracion = 7; // Usado para sistema de alarma y refrigeración

#define DHTPIN A0
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Configuración del MAX31865 para 4 hilos
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(9, 12, 11, 13); // CS, DI, DO, CLK

int numLecturas = 10;

// Intervalos de lectura
const unsigned long intervalPH = 500; // Intervalo de lectura del sensor de pH
const unsigned long intervalPT100 = 500; // Intervalo de lectura del sensor PT100
const unsigned long intervalDHT = 500; // Intervalo de lectura del sensor DHT11
const unsigned long intervalLCD = 1000; // Intervalo de actualización del LCD

unsigned long previousMillisPH = 0;
unsigned long previousMillisPT100 = 0;
unsigned long previousMillisDHT = 0;
unsigned long previousMillisLCD = 0;
```

Fuente. Propia del autor

La figura muestra un fragmento del código del fermentador de café, que incluye funciones claves y secciones `void setup` y `void loop`. Este código es crucial para automatizar y monitorear la fermentación, asegurando que los sensores de temperatura, humedad y pH se mantengan dentro de rangos óptimos. Ante cualquier fluctuación, se activa un sistema de alarma y refrigeración para restablecer las condiciones ideales. Esto permite a los pequeños caficultores producir café de alta calidad, mejorando sus oportunidades económicas y competitividad en el mercado.

La estructura del código permite un monitoreo constante de estos parámetros críticos, lo que es esencial para asegurar una fermentación exitosa y, por ende, una alta calidad del café. Además, el sistema está diseñado para controlar de manera integrada un sistema de alarmas sonoras y lumínicas, así como un mecanismo de refrigeración que responde a las variaciones detectadas por los sensores.

Cuando los sensores detectan fluctuaciones fuera del rango establecido, el sistema activa inmediatamente las alarmas, alertando a los caficultores sobre problemas que puedan comprometer el proceso de fermentación. Esta capacidad de respuesta rápida es crucial, ya que permite tomar medidas correctivas antes de que se produzcan efectos adversos en el café, como la pérdida de sabor o calidad.

Además, el monitoreo automatizado proporciona a los productores la visualización y el monitoreo de los datos que pueden ser analizados para realizar ajustes en el proceso de fermentación. Así, el código no solo actúa como un sistema

de control, sino que también se convierte en una herramienta poderosa para la toma de decisiones informadas, optimizando cada etapa del proceso y asegurando la consistencia y excelencia en la producción del café.

Figura 42. Código QR del código de programación



Fuente. Propia del autor

Al escanear el siguiente código, se accederá al código completo diseñado en el programa y entorno de Arduino el cual debe ser utilizado en el programa Proteus. Este paso es fundamental para asegurar el éxito del proyecto de fermentación del café, ya que permite simular y comprobar el funcionamiento del sistema antes de su instalación física. De este modo, se pueden identificar y corregir posibles errores, garantizando que todo funcione correctamente una vez realizado el montaje. Esta verificación previa contribuye a optimizar recursos y a mejorar la calidad del café producido.

Es crucial guardar y compilar el código en el entorno de desarrollo de Arduino, corrigiendo errores y ajustando las funciones hasta que esté listo para ser utilizado. Esta etapa de depuración es esencial, ya que cualquier fallo en el código podría afectar negativamente el monitoreo y control de los parámetros fisicoquímicos del café.

Una vez revisado y corregido, el siguiente paso es descargar el archivo .hex generado, que es esencial para transferir el programa al microcontrolador Arduino Uno. Esta carga asegura que todas las configuraciones y funciones del sistema de

monitoreo se implementen correctamente, garantizando que el circuito simulado en Proteus funcione adecuadamente. Además, esta etapa permite verificar la compatibilidad entre el código y el hardware, evitando problemas en el funcionamiento del sistema. La correcta implementación del archivo .hex optimiza el rendimiento del microcontrolador y mejora la eficiencia del proyecto de fermentación del café, asegurando la calidad del producto final.

Este enfoque no solo optimiza el proceso de fermentación del café, sino que también minimiza el riesgo de errores operativos, permitiendo a los caficultores contar con un sistema confiable que controla de manera efectiva las condiciones ambientales necesarias para una fermentación de alta calidad. La correcta ejecución de este proceso es clave para alcanzar la eficiencia y consistencia deseadas en la producción del café, asegurando que se mantengan las características únicas del grano en cada lote.

6.5. Validación

Al escanear el código QR, se puede acceder a un video que muestra el correcto funcionamiento del fermentador de café. Esta simulación proporciona una visión clara y detallada de cómo el proyecto beneficia a los pequeños caficultores al optimizar tanto la producción como la calidad del café. Los caficultores podrán observar en acción cómo el fermentador, al controlar parámetros fisicoquímicos como la temperatura, el pH y la humedad, transforma sus métodos de cultivo tradicionales.

Figura 43. Código QR del video del fermentador



Fuente. Propia del autor

El código QR facilita la comprensión del sistema y fomenta su adopción entre los caficultores, mejorando su rendimiento y competitividad en el mercado premium. La implementación de esta tecnología impulsa el desarrollo sostenible de la industria cafetera, proporcionando a los pequeños productores herramientas para garantizar café de alta calidad y maximizar sus beneficios económicos. Además, la simulación en Proteus y el video de funcionamiento del proyecto permiten visualizar claramente sus beneficios, asegurando que todas las funciones se implementen correctamente y contribuyendo a una producción de café más eficiente y de mayor calidad.

En la construcción de los circuitos con Proteus, se desarrolla y compila el código en el programa Arduino, generando un archivo .hex que se carga en la tarjeta Arduino Uno. Esta tarjeta actúa como el controlador principal, garantizando el funcionamiento adecuado de todos los componentes según el diseño.

El Arduino permite el control preciso de los sensores de temperatura, pH y humedad, así como la gestión de la alarma sonora y visual, el motor de refrigeración y la pantalla LCD junto con el terminal virtual para la visualización de datos. Esta integración asegura un funcionamiento eficiente del sistema.

- **Prueba y error**

A partir de la información recopilada, se identificaron problemas comunes en la fermentación del café que enfrentan los pequeños caficultores, especialmente la falta de herramientas para monitorear parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y humedad. Durante la fase de prueba y error, se llevaron a cabo cinco pruebas que mostraron valores fuera de rango, resultando en sabores y olores amargos, lo que destaca la necesidad de un monitoreo constante y preciso. Este enfoque destaca la importancia de un sistema de control para asegurar condiciones óptimas de fermentación, lo que permitirá a los caficultores mejorar la calidad de su café y ser más competitivos en el mercado.

La variabilidad en los parámetros fisicoquímicos puede impactar la calidad del café final, por lo que es necesaria una atención meticulosa. Cada parámetro influye en las reacciones de la fermentación, y cualquier desviación puede generar sabores indeseados. Comprender esta relación ayuda a los caficultores a optimizar el proceso y producir café de calidad superior, lo que mejora la producción y promueve el desarrollo sostenible de la industria cafetera.

Al identificar y analizar estos factores, se busca optimizar el proceso de fermentación y asegurar que los caficultores obtengan café de alta calidad, esencial para competir en un mercado premium. Una automatización efectiva y un monitoreo riguroso de los parámetros fisicoquímicos les brindan herramientas para mejorar sus prácticas y aumentar sus beneficios económicos. Este enfoque integral no solo mejora la calidad del café, sino que también empodera a los pequeños productores en una industria cada vez más competitiva.

A continuación, se presenta información crucial que sirve como base para un análisis detallado de las variaciones en los parámetros fisicoquímicos y su impacto en la producción de café. Este análisis abarca fluctuaciones en la temperatura, el pH y la humedad, así como el tiempo de fermentación y los costos asociados.

Comprender las relaciones entre los parámetros fisicoquímicos en la fermentación del café es fundamental para los pequeños caficultores, ya que les ayuda a identificar áreas de mejora y optimizar su producción. Al monitorear rigurosamente factores como la temperatura, el pH y la humedad, pueden asegurar un café de calidad superior, lo que se traduce en mayores beneficios económicos. Además, la utilización de programas de simulación permite predecir y ajustar estos factores de manera efectiva, contribuyendo a una gestión más sostenible en la industria cafetera. Este enfoque de prueba y error, junto con la simulación, forma una base sólida para tomar decisiones informadas que mejoran la producción.

Se presenta a continuación la tabla de prueba y error que documenta cinco experimentos en el proceso de fermentación del café. Al manipular parámetros fuera del rango ideal, se pudo observar su impacto en la calidad del café, facilitando la identificación de errores y ajustes necesarios. Además, las simulaciones permiten predecir resultados sin comprometer la calidad del producto, brindando así una base sólida para decisiones informadas que mejoran la producción y aseguran un café de alta calidad.

Estos ensayos fueron esenciales para identificar errores y problemas que afectan negativamente la calidad del producto final, así como el sabor y el aroma del café.

Tabla 12.Prueba y error

PRUEBA Y ERROR			
#	VARIABLES OPERATIVAS	RANGO	OBSERVACIÓN
1	Temperatura interna	20°C - 25°C	La temperatura interna es demasiado baja; puede ralentizar procesos biológicos o químicos.
	Temperatura ambiente	15°C - 18°C	Temperatura ambiente baja puede afectar el rendimiento del sistema.
	pH	2 – 3	pH demasiado bajo puede dañar cultivos y afectar la viabilidad de organismos.
	Humedad	0% - 40%	Baja humedad puede causar deshidratación de productos.
2	Temperatura interna	30°C - 35°C	Temperatura elevada puede provocar descomposición de materiales sensibles.
	Temperatura ambiente	35°C - 40°C	Alta temperatura ambiente genera estrés en los organismos.
	pH	7 – 9	pH alto puede inhibir microorganismos beneficiosos y alterar la calidad del producto.
	Humedad	80% - 90%	Alta humedad puede provocar moho y bacterias, afectando la calidad.
3	Temperatura interna	15°C - 20°C	Temperatura baja puede aumentar la viscosidad de líquidos, dificultando procesos.
	Temperatura ambiente	10°C - 15°C	Enfriamiento excesivo afecta eficiencia energética y maquinaria.
	pH	1 – 2	pH bajo puede ser corrosivo y perjudicial para equipos.
	Humedad	90% - 100%	Alta humedad puede causar condensación, dañando productos.
4	Temperatura interna	35°C - 40°C	Temperaturas altas ocasionan reacciones indeseadas y pérdida de calidad.
	Temperatura ambiente	40°C - 45°C	Puede causar fallos en refrigeración y estrés térmico en empleados.
	pH	0 – 1	pH extremadamente bajo puede ser letal para organismos.
	Humedad	30% - 40%	Humedad moderada puede ser ineficiente para procesos específicos.
5	Temperatura interna	0°C - 10°C	Temperaturas muy bajas pueden congelar productos, afectando su calidad.
	Temperatura ambiente	0°C - 5°C	Puede provocar congelamiento de sistemas y limitar operaciones.
	pH	10 – 12	pH alto puede causar precipitación de minerales, afectando producción.
	Humedad	20% - 30%	Humedad inadecuada puede afectar conservación de productos.

Fuente. Propia del autor

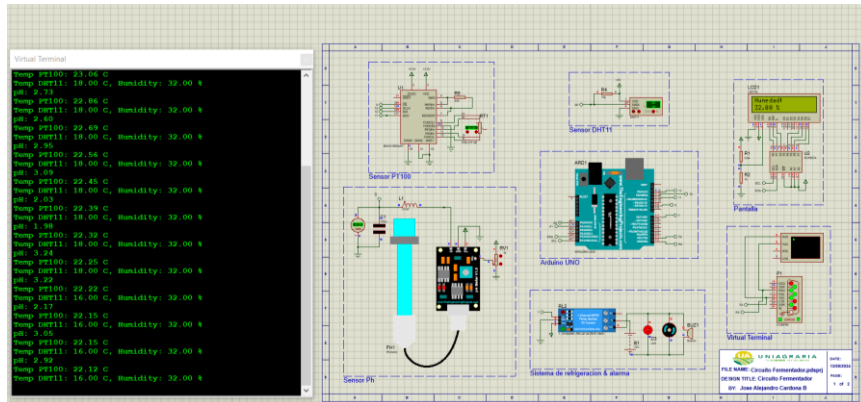
El proceso de prueba y error es crucial para optimizar la fermentación del café, permitiendo a los caficultores ajustar variables como temperatura, pH y humedad, que afectan directamente la calidad del producto. Mantener estos parámetros en rangos ideales es esencial para evitar pérdidas de calidad y sabores indeseados. Este enfoque no solo mejora el café, sino que también aumenta la competitividad en un mercado que valora la excelencia. A continuación, se presentarán las cinco pruebas realizadas, destacando las fluctuaciones y problemas asociados con los parámetros fisicoquímicos fuera de rango.

- **Prueba #1**

En la primera prueba del proceso de fermentación del café en medio anaeróbico, se identificaron factores críticos que afectan la calidad del producto final. Se observó que una temperatura interna entre 20°C y 25°C ralentiza los procesos biológicos esenciales, dificultando el desarrollo de microorganismos beneficiosos y resultando en un café de calidad inferior. Además, una temperatura ambiente de 15°C a 18°C reduce la eficiencia del sistema de fermentación, limitando la capacidad de los caficultores para producir café de altos estándares. Estos hallazgos resaltan la importancia de ajustar y monitorear constantemente estas variables para mejorar la calidad del café y fortalecer la competitividad en el mercado.

Los niveles de pH medidos entre 2 y 3 durante el proceso de fermentación del café se consideran demasiado bajos, lo que puede comprometer la viabilidad de los cultivos y dañar los granos. Además, la humedad es un factor crítico: un rango de 0% a 40% puede causar deshidratación de los granos, afectando su calidad y sabor. Estos hallazgos destacan la necesidad de un monitoreo constante de las variables físicas y químicas en la fermentación. Ajustar adecuadamente estas condiciones no solo mejora la calidad del café, sino que también incrementa la productividad económica de los caficultores, permitiéndoles competir de manera más efectiva en el mercado.

Figura 44. Prueba #1



Fuente. Propia del autor

La figura 44 muestra la prueba #1 de la tarjeta de control para la fermentación anaeróbica, diseñada para monitorear y regular los parámetros fisicoquímicos del proceso. Cuando estos parámetros están fuera del rango ideal, se activa una alarma sonora, visual y un sistema de refrigeración, alertando a los pequeños caficultores sobre el problema. Esto les permite actuar rápidamente para corregir la situación, mejorando así la calidad del café y aumentando su competitividad en el mercado. La integración de pruebas y simulaciones es esencial para optimizar el uso de esta tecnología.

Figura 45. Código QR Prueba #1



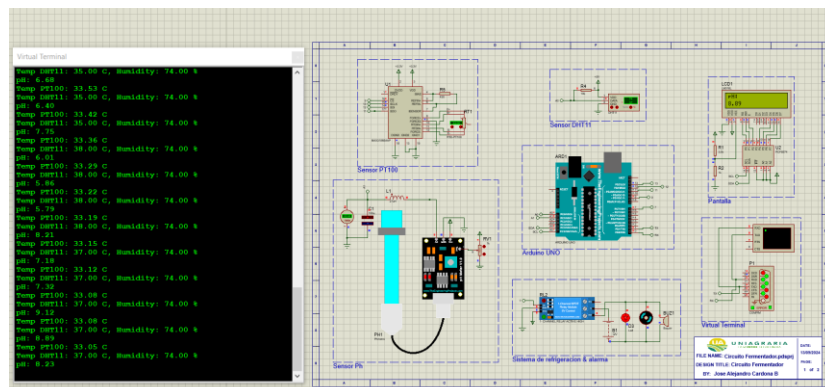
Fuente. Propia del autor

La figura 45 presenta el código QR de la prueba #1, que permite a los caficultores analizar la variación en el rango de los sensores que monitorean los parámetros fisicoquímicos del café. Este código es esencial para identificar problemas que pueden surgir durante el proceso de fermentación, ya que los sensores informan sobre valores que no cumplen con los rangos ideales necesarios para una fermentación adecuada. Al utilizar este análisis de prueba y error junto con simulaciones, los caficultores pueden ajustar rápidamente las condiciones, lo que mejora la calidad del café y aumenta la eficiencia del proceso, garantizando así un producto final competitivo en el mercado.

- **Prueba #2**

En la segunda prueba se evidenció que mantener temperaturas entre 30°C y 35°C puede descomponer materiales sensibles, afectando la calidad del café durante el proceso de fermentación. Además, se observó que un pH elevado, en el rango de 7 a 9, inhibe la actividad de microorganismos beneficiosos que son esenciales para desarrollar los sabores y aromas característicos del café. La humedad también juega un papel crítico; niveles altos, entre 80% y 90%, crean un ambiente propicio para el crecimiento de moho, lo que deteriora aún más el producto final.

Figura 46. Prueba #2



Fuente. Propia del autor

La figura 46 muestra la prueba #2 de la tarjeta de control para la fermentación anaeróbica, que supervisa los parámetros fisicoquímicos del proceso. En esta prueba, se registraron valores fuera del rango ideal, como temperatura interna (30°C - 35°C), temperatura ambiente (35°C - 40°C), pH (7 - 9) y humedad (70% - 80%). Si alguno de estos parámetros se desvía, se activa una alarma sonora, visual y

refrigerante, alertando a los caficultores para que puedan actuar rápidamente. Esto les ayuda a mejorar la calidad del café y su competitividad en el mercado. La combinación de pruebas y simulaciones es esencial para optimizar esta tecnología y facilitar ajustes en la producción.

Figura 47. Código QR Prueba #2



Fuente. Propia del autor

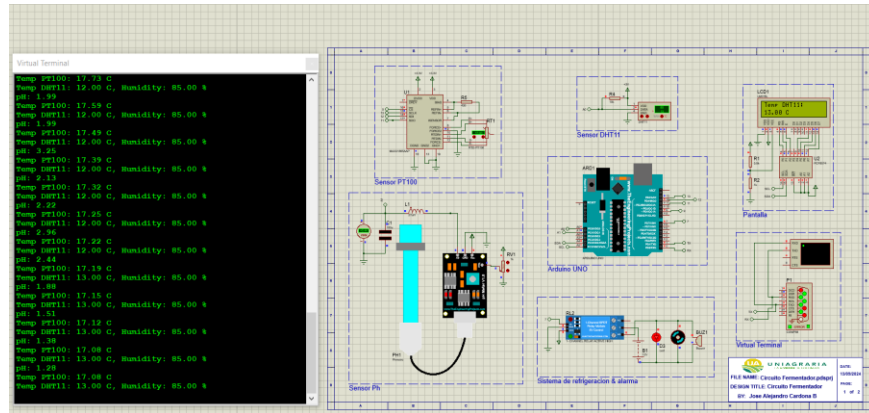
La figura siguiente muestra un código QR que dirige a un video de la prueba #2, en el que se pueden ver las variaciones en los parámetros fisicoquímicos durante la fermentación del café. En esta prueba, se registraron valores que estaban fuera del rango ideal, como temperaturas de 30°C a 35°C y un pH de 7 a 9. Estos resultados destacan la importancia de monitorear constantemente estos factores. Si alguno de ellos se desvía, se activan alarmas que alertan a los caficultores para que puedan corregir rápidamente la situación, lo que ayuda a mejorar la calidad del café y su competitividad en el mercado.

- **Prueba #3**

En esta prueba se registraron valores fuera del rango ideal, revelando que mantener una temperatura interna de 15°C a 20°C incrementa la viscosidad de los líquidos, complicando la fermentación del café y afectando la eficiencia de los sabores y aromas. Además, un pH bajo (1 a 2) puede dañar el equipo, generando costos de mantenimiento, mientras que una humedad excesiva (80% a 90%) afecta la calidad de los granos. Estos hallazgos destacan la importancia de un enfoque sistemático para ajustar los parámetros de fermentación, lo que permitirá a los

caficultores optimizar sus procesos y mejorar la calidad del café, promoviendo al mismo tiempo un desarrollo sostenible en la industria.

Figura 48. Prueba #3



Fuente. Propia del autor

En esta prueba, se registraron valores fuera del rango ideal, evidenciados en la figura del diseño de la tarjeta de fermentación anaeróbica. Se encontró que mantener una temperatura interna de 15°C a 20°C incrementa la viscosidad, complicando la fermentación del café y afectando los sabores. Un pH bajo (1 a 2) puede dañar el equipo y generar costos de mantenimiento, mientras que una humedad excesiva (80% a 90%) deteriora la calidad de los granos. Estos hallazgos resaltan la necesidad de un enfoque sistemático para ajustar los parámetros de fermentación y mejorar la calidad del café, promoviendo un desarrollo sostenible en la industria.

Figura 49. Código QR Prueba #3



Fuente. Propia del autor

Figura 51. Código QR Prueba #4



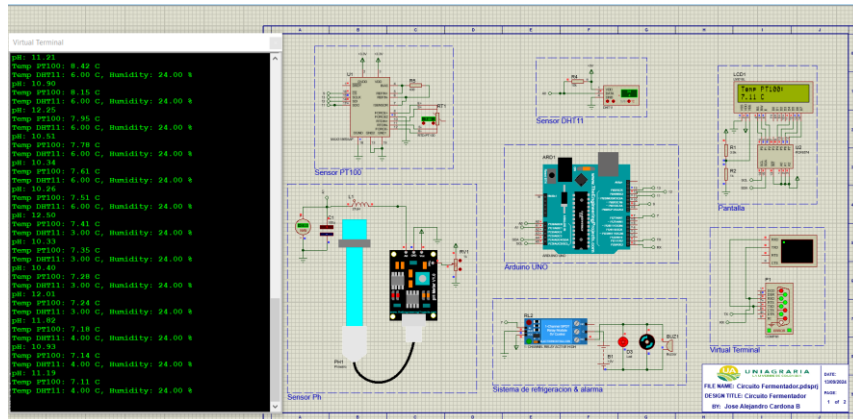
Fuente. Propia del autor

Se registraron valores que no cumplen con el rango ideal, como se observa en el video disponible mediante el código QR. Factores críticos, como temperaturas internas de 35°C a 40°C y temperaturas ambientales de 40°C a 45°C, impactan negativamente la calidad del café y crean condiciones laborales inseguras. Además, un pH extremadamente bajo (0 a 1) es dañino para los microorganismos beneficiosos, mientras que una humedad moderada (30% a 40%) resulta ineficaz. Estos resultados enfatizan la necesidad de adoptar un enfoque sistemático para ajustar los parámetros de fermentación, lo que mejorará la calidad del café y promoverá un desarrollo sostenible en la industria.

- **Prueba #5**

En esta última prueba las simulaciones revelaron riesgos significativos en las condiciones de fermentación del café. Se observó que temperaturas internas de 0°C a 10°C pueden congelar los productos, afectando gravemente su calidad, mientras que temperaturas ambientales de 0°C a 5°C pueden dañar los sistemas de refrigeración. Un pH alto (10 a 12) puede provocar la precipitación de minerales, y una humedad inadecuada (20% a 30%) puede resultar en pérdidas económicas. Estos hallazgos destacan la importancia de un enfoque de prueba y error, junto con simulaciones, para ajustar las condiciones de fermentación y optimizar la calidad del café, asegurando su competitividad en el mercado.

Figura 52. Prueba #5



Fuente. Propia del autor

En esta prueba, se identificaron valores que no se encuentran dentro del rango ideal como se puede observar en la figura. Se detectó que las temperaturas internas entre 0°C y 10°C pueden ocasionar la congelación de los productos, afectando seriamente la calidad del café. Asimismo, las temperaturas ambientales que varían de 0°C a 5°C pueden perjudicar los sistemas de refrigeración. Adicionalmente, un pH alto (10 a 12) puede causar la precipitación de minerales, y una humedad inadecuada de entre (20% y 30%) puede generar pérdidas económicas para los caficultores. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de un enfoque sistemático que combine pruebas y simulaciones para ajustar las condiciones de fermentación, optimizando así la calidad del café y asegurando su competitividad en el mercado.

Figura 53. Código QR Prueba #5



Fuente. Propia del autor

Se identificaron valores fuera del rango óptimo que indican un mal control de los parámetros fisicoquímicos, como se evidencia en el video accesible al escanear el código QR. Las temperaturas internas de 0°C a 10°C y las temperaturas ambientales de 0°C a 5°C, un pH elevado (10 a 12) puede causar la precipitación de minerales, y una humedad inadecuada (20% a 30%) puede resultar en pérdidas económicas significativas para los caficultores. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar un enfoque sistemático que integre pruebas y simulaciones, optimizando así las condiciones de fermentación para mejorar la calidad del café y garantizar su competitividad en el mercado.

Se realizaron cinco pruebas con parámetros fisicoquímicos fuera del rango ideal para mostrar los problemas que surgen al no controlar adecuadamente la fermentación del café. Esta investigación es clave para que los pequeños caficultores comprendan que una fermentación adecuada asegura un café de calidad y les permite competir en un mercado premium. Al adoptar un enfoque de prueba y error y simular variables fisicoquímicas, los productores pueden ajustar las condiciones de fermentación, subrayando la importancia de mantener los parámetros óptimos para garantizar la competitividad y la sostenibilidad de su producción.

Tabla 13. Variables Operativas en Pruebas de Error

VARIABLE	Prueba #1	Prueba #2	Prueba #3	Prueba #4	Prueba #5
Temperatura interna	20°C - 25°C	30°C - 35°C	15°C - 20°C	35°C - 40°C	0°C - 10°C
Temperatura ambiente	15°C - 18°C	35°C - 40°C	10°C - 15°C	40°C - 45°C	0°C - 5°C
pH	2 - 3	7 - 9	1 - 2	0 - 1	10 - 12
Humedad	0% - 40%	70% - 80%	80% - 90%	30% - 40%	20% - 30%

Fuente. Propia del autor

La tabla presentada muestra las variables operativas que están fuera de los rangos ideales, basadas en cinco pruebas que evidencian las fluctuaciones en los parámetros fisicoquímicos esenciales para la fermentación del café: temperatura interna, temperatura ambiente, pH y humedad. Cada parámetro se evaluó en cinco rangos diferentes, indicando las condiciones que pueden provocar efectos adversos en los procesos biológicos y químicos. Un mal control de estas variables puede resultar en problemas que afectan la calidad del café y la viabilidad económica de los caficultores, lo que resalta la importancia de un monitoreo constante para asegurar condiciones óptimas de fermentación.

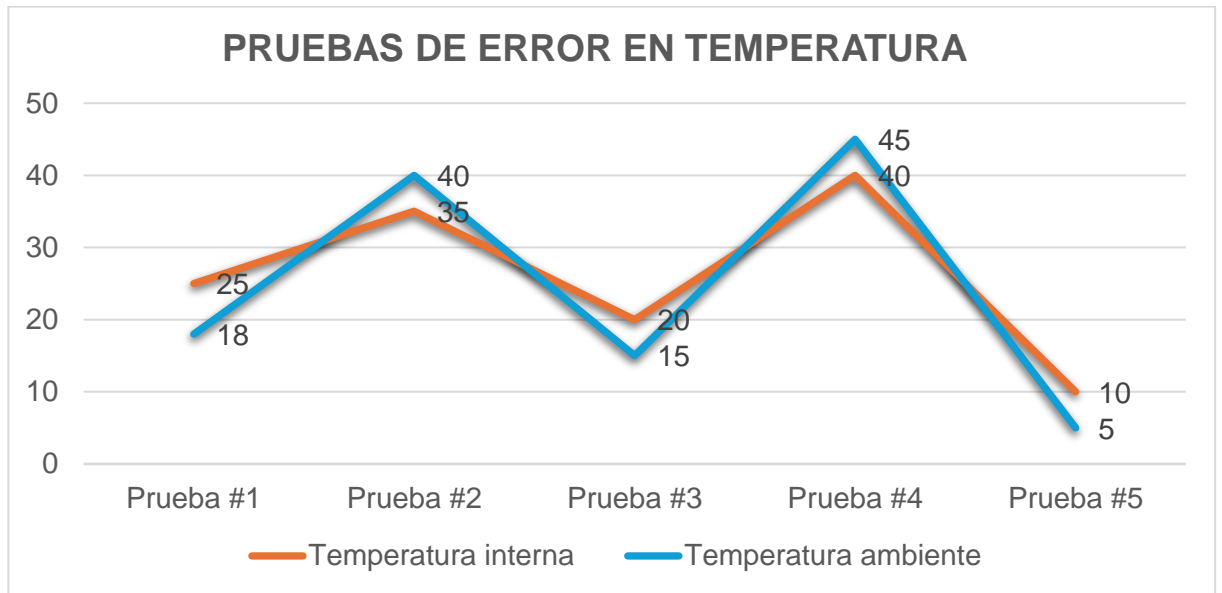
Por ejemplo, un pH demasiado bajo o alto puede perjudicar tanto los cultivos de café como los microorganismos beneficiosos, afectando la calidad y el sabor del producto final. Asimismo, temperaturas extremas pueden provocar la descomposición de materiales o la congelación de productos, resultando en pérdidas significativas.

Estas observaciones son cruciales para la gestión eficiente de sistemas que dependen de condiciones ambientales controladas, y su monitoreo constante es especialmente relevante en un proyecto que busca automatizar y optimizar la fermentación del café.

En un proyecto de fermentación del café, la automatización y el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos permiten un control más preciso de las condiciones necesarias para lograr una fermentación exitosa. Mantener la temperatura y la humedad dentro de los rangos ideales maximiza la actividad de los microorganismos beneficiosos y minimiza el riesgo de contaminación y deterioro. Además, el seguimiento del pH es fundamental para asegurar que el entorno permanezca propicio para las reacciones deseadas, lo que influye directamente en la calidad final del café.

Con la implementación de sistemas de monitoreo automatizados, es posible ajustar rápidamente las condiciones garantizando que el proceso de fermentación se lleve a cabo de manera eficiente y controlada. La correcta interpretación de la tabla y su representación gráfica son herramientas útiles para la evaluación de riesgos y facilitan la toma de decisiones informadas, lo que puede mejorar significativamente la calidad y consistencia del café producido. Esto no solo beneficia a los caficultores, sino que también contribuye al reconocimiento del café en mercados más amplios.

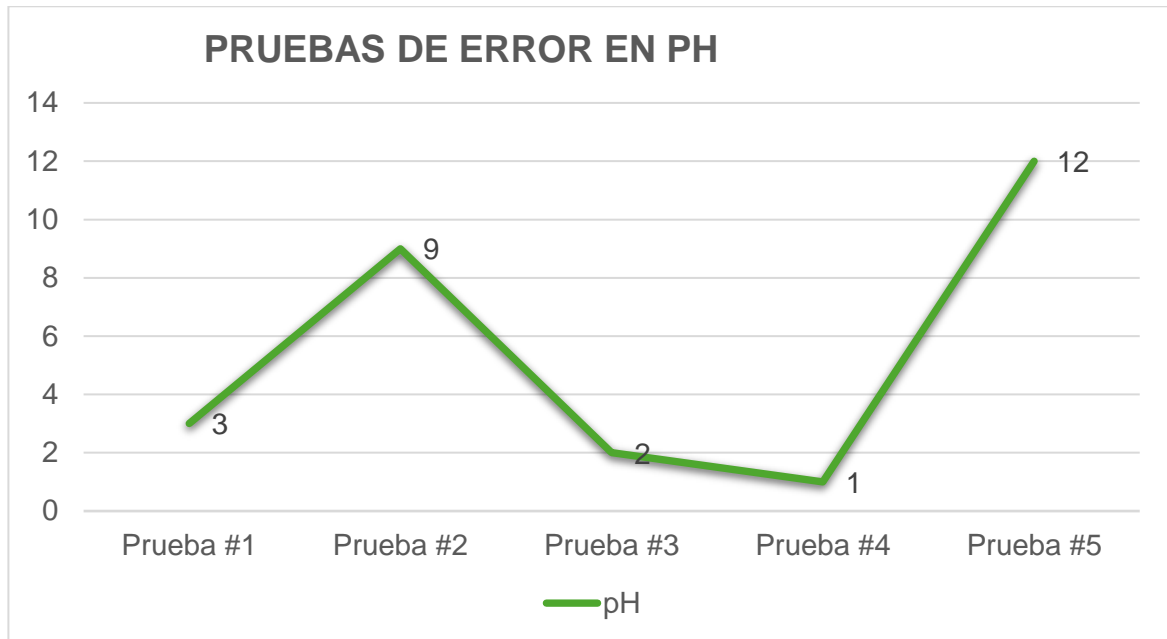
Figura 54. Temperatura interna y ambiente



Fuente. Propia del autor

En la figura 54 se muestran los rangos de temperatura interna y ambiental utilizados en cinco pruebas de fermentación del café. Un control inadecuado de estos parámetros puede generar problemas como sabores y olores indeseados, así como sobre fermentación. Temperaturas fuera de los rangos óptimos afectan el equilibrio de los microorganismos, comprometiendo la calidad del café y resultando en pérdidas económicas significativas para los pequeños caficultores, quienes son particularmente vulnerables y carecen de apoyo regulatorio. Por ello, es crucial implementar un monitoreo riguroso de los parámetros fisicoquímicos, incluyendo la temperatura, para asegurar un café de alta calidad y fomentar prácticas sostenibles en la producción, beneficiando así a los caficultores y fortaleciendo el sector.

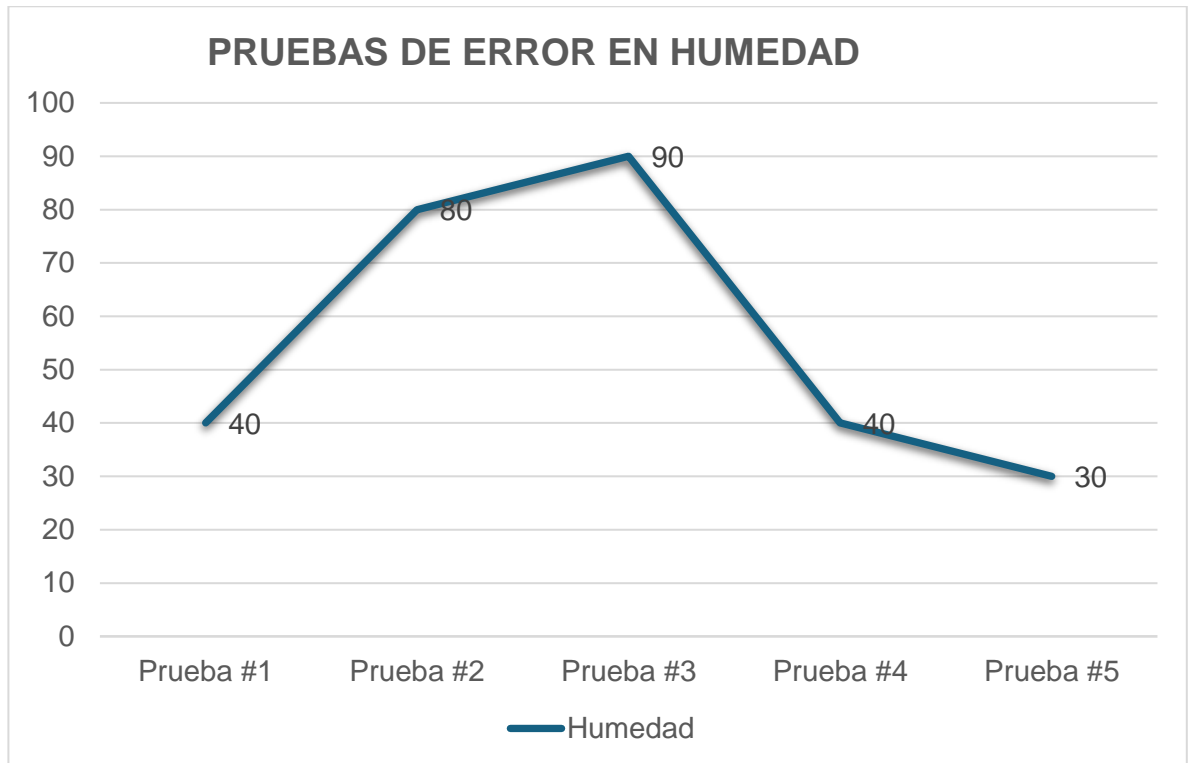
Figura 55. Ph



Fuente. Propia del autor

La figura muestra los rangos de pH utilizados en cinco pruebas de fermentación anaeróbica del café, destacando que un control inadecuado de este parámetro puede causar sabores y olores no deseados, así como sobre fermentación. Un pH fuera del rango óptimo lleva a un comportamiento descontrolado de los microorganismos, afectando negativamente la calidad del café y generando pérdidas económicas para pequeños caficultores, quienes a menudo carecen de apoyo regulatorio. Para garantizar un café de alta calidad y promover la sostenibilidad, es esencial implementar un monitoreo riguroso de los parámetros fisicoquímicos, especialmente del pH, lo que beneficiará a los caficultores y fortalecerá este sector clave.

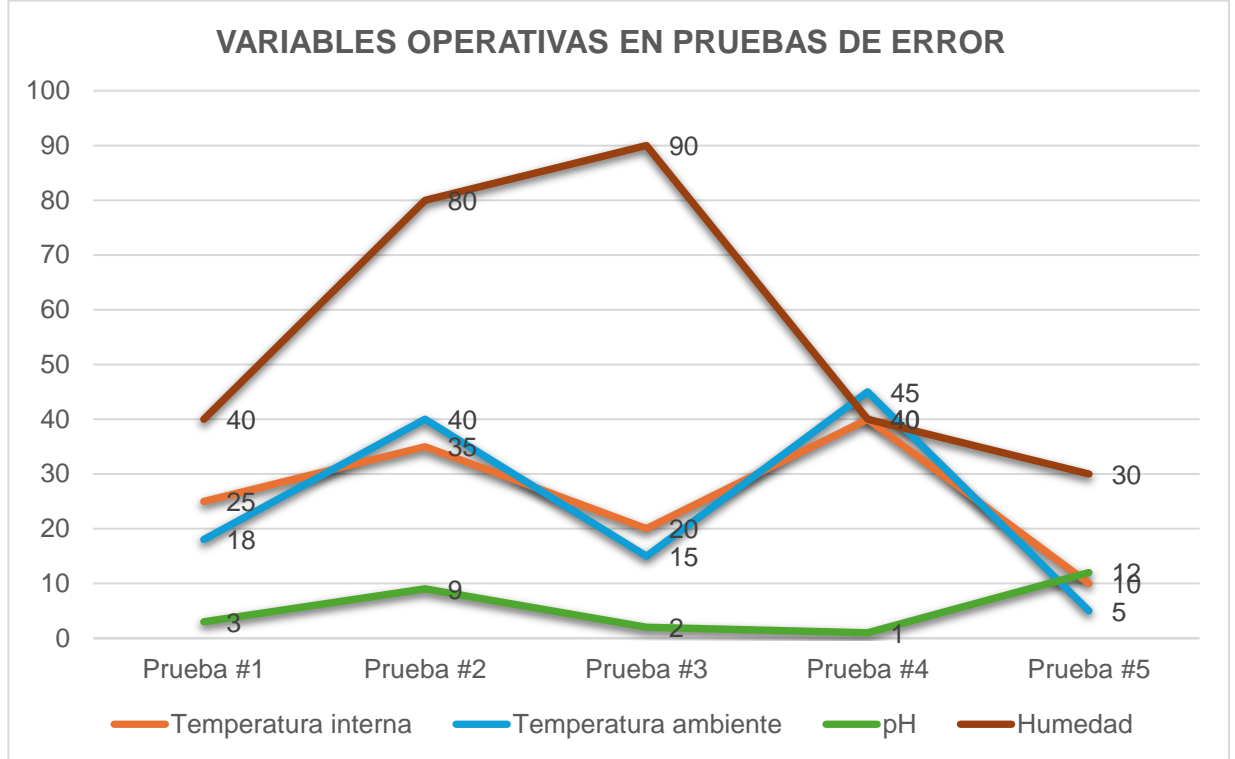
Figura 56. Humedad



Fuente. Propia del autor

La figura presenta los rangos de humedad relativa empleados en las pruebas de fermentación anaeróbica del café, destacando que un control inadecuado de este parámetro puede ocasionar problemas serios de sobre fermentación. Cuando la humedad se encuentra fuera de los límites establecidos, las condiciones se vuelven desfavorables para los microorganismos encargados de la fermentación, lo que afecta la calidad del café y genera sabores y olores indeseados. Esta problemática puede resultar en pérdidas económicas para los pequeños caficultores, quienes a menudo no cuentan con el apoyo regulatorio necesario. Por ello, es crucial implementar un monitoreo riguroso de los parámetros fisicoquímicos, con un enfoque especial en la humedad relativa, para garantizar un café de alta calidad y promover prácticas sostenibles, beneficiando así tanto a los caficultores como al sector en general.

Figura 57. Análisis de Errores Operativos



Fuente. Propia del autor

La figura presentada permite a los pequeños caficultores analizar las fluctuaciones por un mal control de los parámetros fisicoquímicos, como temperatura, humedad y pH, evidenciadas en cinco pruebas. El gráfico de colores facilita la identificación de límites críticos, ayudando a detectar problemas que pueden resultar en pérdidas de recursos y tiempo. Mantener condiciones óptimas es esencial para garantizar un café de alta calidad, haciendo de esta herramienta un recurso indispensable.

Al observar el gráfico, los caficultores pueden identificar claramente los rangos problemáticos, especialmente aquellos relacionados con temperaturas extremas y niveles de humedad. Esta identificación rápida permite tomar decisiones informadas y oportunas, asegurando que se preste atención especial a las condiciones que podrían afectar negativamente la calidad del café. De esta forma, el gráfico se convierte en una herramienta vital para la gestión eficaz del proceso de fermentación, ayudando a garantizar la excelencia del producto final.

Esta representación gráfica ofrece una comprensión inmediata de las condiciones ideales necesarias para una fermentación exitosa, al mismo tiempo que destaca los posibles problemas que pueden surgir si los parámetros se desvían de los rangos recomendados. Por ejemplo, temperaturas excesivamente altas pueden acelerar la fermentación de manera descontrolada, alterando el perfil de sabor del café, mientras que una humedad inadecuada puede propiciar la formación de moho y la pérdida de calidad.

Un sistema de monitoreo automatizado es esencial para controlar los parámetros fisicoquímicos en la fermentación del café, permitiendo a los caficultores mantener condiciones óptimas. Esta herramienta facilita la identificación y corrección rápida de desviaciones, asegurando la calidad del producto final. Al optimizar los procesos de fermentación, se logra consistencia y excelencia, lo que es crucial para competir en un mercado exigente. Además, su implementación promueve una producción más sostenible y eficiente.

Durante la fase de prueba y error en el proyecto de fermentación del café, se evidencian diversas falencias que enfrentan los pequeños caficultores al carecer de un sistema de automatización y monitoreo adecuado. Estas deficiencias, que incluyen variaciones incontroladas en los parámetros fisicoquímicos, pueden llevar a una fermentación inconsistente y, como consecuencia, a un producto final de menor calidad.

Por esta razón, es fundamental que, desde el inicio del proyecto, se establezcan claramente los rangos ideales para cada parámetro fisicoquímico a evaluar, tales como la temperatura, la humedad y el pH. Definir estos rangos permitirá a los caficultores identificar y corregir problemas antes de que impacten negativamente en la calidad del café, asegurando así un proceso de fermentación más controlado y eficiente.

Este proyecto implementará un sistema de automatización y monitoreo que utilizará sensores de alta precisión para medir parámetros fisicoquímicos como temperatura, humedad y pH. Esta tecnología permitirá a los caficultores hacer ajustes en tiempo real, asegurando que las condiciones de fermentación se mantengan dentro de los límites óptimos. La respuesta inmediata a desviaciones es crucial para preservar la calidad del café y, por ende, la rentabilidad de la producción. Además, se busca capacitar a los caficultores sobre la importancia del monitoreo riguroso, promoviendo prácticas más eficientes en el proceso de fermentación.

7. RECURSOS

Este proyecto requerirá una inversión significativa en recursos humanos y materiales para garantizar un diseño y ejecución óptimos del sistema de fermentación del café, recomendando el uso de equipos de calidad industrial para asegurar su durabilidad y eficiencia. Sin embargo, estos costos solo se aplicarán si se decide avanzar más allá de la fase de prototipo, y variarán según factores como el costo de los materiales, la mano de obra y los equipos necesarios para la implementación a mayor escala.

Se proporcionará una tabla detallada con los costos del proyecto en pesos colombianos, facilitando la comprensión de las inversiones necesarias y la planificación financiera. Estos costos son estimaciones preliminares que pueden variar según materiales y mano de obra. La implementación de programas de simulación para controlar parámetros fisicoquímicos optimiza la fermentación, justificando la inversión inicial por su potencial retorno económico y de reputación.

Tabla 14.Presupuesto.

MANO DE OBRA					
Cantidad	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor total
30	Personal	Personal capacitado	Hora	\$ 20.000	\$ 600.000
COMPONENTES					
1	Tarjeta eléctrica	Compra	unidad	\$ 200.900	\$ 200.900
TOTAL:					\$ 200.900
SOFTWARE Y COMPUTACIONALES					
30	Software Proteus	Libre	Horas	\$ 7.000	\$ 210.000
10	Software Arduino	Libre	Horas	\$ 4.000	\$ 40.000
20	Software SolidWorks	Libre	Horas	\$ 5.000	\$100.000
1	Celular gama media	uso	unidad	\$ 600.000	\$ 600.000
TOTAL					\$ 950.000
OTROS					
1	Imprevistos			\$ 200.000	\$ 200.000
TOTAL					\$ 200.000
TOTAL GENERAL					\$ 1.950.900

Fuente . Propia del autor

Si desea obtener información más clara sobre los componentes utilizados en el proyecto y sus costos, puede consultar el Anexo F. Allí se presenta una figura con

la lista de materiales necesarios para construir la tarjeta madre, incluyendo sus referencias y precios en pesos colombianos. El costo total es de 200.900,00 COP, lo que la hace más económica y accesible en comparación con otros fermentadores del mercado.

El uso de software de simulación como Arduino, Proteus y SolidWorks es crucial para que los caficultores diseñen sistemas eficientes. Estas herramientas permiten modelar diferentes escenarios y predecir resultados, lo que facilita decisiones informadas. Con un enfoque de prueba y error, los caficultores pueden identificar problemas en sus procesos de fermentación y ajustar los parámetros necesarios. Esto les ayuda a optimizar la producción sin comprometer la calidad del café. Además, esta tecnología mejora la rentabilidad y el reconocimiento del café colombiano en el mercado global, contribuyendo al desarrollo sostenible de las comunidades cafetaleras.

8. CONCLUSIONES

Esta etapa del proyecto destaca la necesidad de habilidades técnicas especializadas para el diseño y simulación de un sistema de fermentación de café utilizando herramientas como Arduino, Proteus y SolidWorks. La integración de estos programas no solo permite crear un diseño eficiente, sino que también facilita la identificación de posibles problemas en diversas condiciones a través de la simulación. Este enfoque es fundamental para optimizar el sistema antes de su implementación física, asegurando que el proyecto alcance los estándares de calidad y eficiencia requeridos para una exitosa fermentación del café.

Este proyecto busca transformar la agricultura del café mediante un análisis detallado y el uso de tecnología avanzada, como circuitos electrónicos con Arduino. La recolección de datos y la integración de información actualizada son esenciales para desarrollar soluciones efectivas que mejoren las prácticas agrícolas. Al optimizar el proceso de fermentación, se pretende elevar la calidad del café, beneficiando a los pequeños caficultores y fortaleciendo su competitividad en el mercado global. Además, se promueve la sostenibilidad y se empodera a los productores, contribuyendo a un futuro más viable y rentable para la comunidad cafetalera.

La revisión de más de 54,000 documentos y el análisis de 41,000 publicaciones recientes han permitido identificar tendencias y soluciones en la caficultura, fundamentando el estudio en literatura actualizada. Herramientas como Mendeley han optimizado la gestión documental, mejorando la eficiencia de la investigación. Al centrarse en pequeños y medianos caficultores y prácticas sostenibles, la investigación no solo analiza el papel de los fermentadores, sino que también establece un camino para la implementación de técnicas modernas y estrategias que promuevan el desarrollo sostenible, beneficiando a los productores más vulnerables.

La evaluación de documentos sobre la fermentación anaeróbica del café destaca la validez de las conclusiones del estudio, al utilizar fuentes actuales. Esto ayuda a los productores a identificar técnicas eficientes y sostenibles mediante el análisis de biorreactores. La investigación también aborda la inversión tecnológica y el uso de software para monitorear procesos, esenciales para mejorar la calidad del café. Al capacitar a pequeños y medianos productores, se promueve una producción responsable y sostenible, beneficiando la economía de los caficultores y el medio ambiente.

La evaluación de documentos sobre la fermentación anaeróbica del café subraya la relevancia y actualidad de las fuentes, fortaleciendo la validez de las conclusiones del estudio. Esta base sólida aumenta la credibilidad del trabajo y ayuda a los productores a identificar técnicas eficientes y sostenibles al analizar distintos biorreactores y sus variables. La investigación ofrece una visión integral sobre la inversión tecnológica y el uso de software para el monitoreo del proceso, elementos clave para mejorar la calidad del café. Al capacitar a pequeños y medianos productores, se fomenta una producción responsable y sostenible, beneficiando tanto la economía de los caficultores como el medio ambiente.

La ingeniería es fundamental en la fermentación del café, ya que controla parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y humedad, garantizando la calidad del producto. La combinación de ingeniería electrónica, mecánica y de software optimiza el proceso y permite a los caficultores adaptar las condiciones a sus necesidades. Esta innovación mejora la competitividad y sostenibilidad de los pequeños productores, dándoles acceso a técnicas avanzadas. Al utilizar un microcontrolador ATmega328P con Arduino para el monitoreo, se promueve la producción de cafés de alta calidad y sostenibles, apoyando el desarrollo económico de los caficultores en el mercado premium.

Mantener una temperatura interna entre 25°C y 30°C es crucial para una fermentación óptima del café, favoreciendo la actividad de levaduras y bacterias. También es importante controlar la temperatura ambiente, la humedad (40% a 70%) y el pH (3 a 6) para preservar la calidad del grano y potenciar los sabores. Un manejo adecuado de estos parámetros maximiza el potencial de cada cosecha y permite a los productores experimentar, promoviendo una producción más consistente y de alta calidad. Integrar ciencia y tecnología en la fermentación no solo mejora el café, sino que también establece nuevos estándares de sostenibilidad en la industria.

El diseño de la tarjeta en 3D en Proteus es fundamental para el proyecto de fermentación del café, ya que permite visualizar y optimizar el control de parámetros como temperatura, pH y humedad. Esto mejora la disposición de componentes y simula el fermentador anaeróbico, elevando la calidad del café para los pequeños caficultores. La identificación temprana de errores optimiza el rendimiento del sistema y fortalece la competitividad en el mercado. Además, el monitoreo preciso es crucial para mejorar la calidad del café y promover la sostenibilidad y rentabilidad de la producción, empoderando a los pequeños productores.

La primera prueba del proceso de fermentación del café en medio anaeróbico identificó factores críticos que afectan la calidad del producto, como la temperatura interna (20°C a 25°C) y ambiental (15°C a 18°C), así como los niveles de pH y humedad. Estas condiciones pueden ralentizar los procesos biológicos y limitar la eficiencia de la fermentación, comprometiendo la calidad del café. La segunda prueba mostró que temperaturas entre 30°C y 35°C pueden descomponer materiales sensibles y un pH elevado de 7 a 9 inhibe microorganismos beneficiosos, cruciales para el sabor y aroma. Además, niveles altos de humedad (80% a 90%) favorecen el moho. Estos hallazgos destacan la importancia de un monitoreo constante y ajustes precisos en estos parámetros para mejorar la calidad del café y aumentar la competitividad y productividad económica de los caficultores.

La prueba mostró que una temperatura interna de 15°C a 20°C aumenta la viscosidad, dificultando la fermentación y afectando los sabores. Un pH bajo (1 a 2) puede dañar el equipo y comprometer la calidad, mientras que la humedad excesiva (80% a 90%) perjudica los granos. Temperaturas internas de 35°C a 40°C y ambientales de 40°C a 45°C deterioran la calidad y generan riesgos laborales. Un pH extremadamente bajo (0 a 1) afecta microorganismos beneficiosos, y una humedad moderada (30% a 40%) es ineficaz. Temperaturas de 0°C a 10°C pueden congelar productos, y un pH alto (10 a 12) causa precipitación de minerales, mientras que una humedad inadecuada (20% a 30%) puede generar pérdidas económicas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de un enfoque sistemático para ajustar los parámetros de fermentación y optimizar la calidad del café, asegurando su competitividad y sostenibilidad en la industria.

La investigación sobre la fermentación del café subraya la importancia de mantener los parámetros fisicoquímicos, como temperatura, pH y humedad, en rangos ideales para asegurar la calidad del producto y la viabilidad económica de los pequeños caficultores. Un enfoque de prueba y error es clave para ajustar las condiciones de fermentación, destacando la necesidad de monitoreo constante y prácticas óptimas. La falta de automatización y un sistema de monitoreo adecuado generan inconsistencias en la fermentación y afectan la calidad del café. Por ello, es crucial establecer rangos ideales, utilizar sensores de alta precisión y capacitar a los caficultores en el monitoreo riguroso para lograr una producción sostenible y rentable.

9. RECOMENDACIONES

Es fundamental que los lectores comprendan en detalle el propósito y los beneficios del sistema automatizado diseñado. Esto incluye entender cómo el sistema puede mejorar la calidad del café y optimizar la eficiencia operativa para los pequeños productores.

Considerando las particularidades del entorno y las necesidades específicas de los pequeños caficultores en diferentes regiones de Colombia. El sistema debe poder adaptarse a variaciones climáticas, recursos disponibles y prácticas agrícolas locales para maximizar su utilidad y aceptación.

Es esencial promover el monitoreo continuo del sistema y la evaluación de resultados para los usuarios, que implica recopilar datos sobre la calidad del café, la eficiencia del sistema y los beneficios económicos. Esta retroalimentación permite identificar áreas para mejorar y optimizar. Además, es crucial integrar prácticas agrícolas sostenibles junto con la implementación del sistema automatizado, como la gestión eficiente del agua, el manejo responsable de residuos y la conservación de recursos naturales. Un enfoque sostenible fortalecerá la viabilidad a largo plazo del proyecto y elevará la reputación ambiental de los caficultores involucrados.

Al seguir estas recomendaciones, los lectores podrán obtener el máximo provecho del proyecto de diseño de un sistema automatizado y monitoreado para la estandarización del proceso de fermentación anaeróbica del café en Colombia, contribuyendo así al desarrollo sostenible y competitivo de la industria cafetalera local.

Es crucial involucrar a los agricultores desde el inicio del proyecto, asegurándose de que entiendan cómo el sistema automatizado puede beneficiar sus prácticas de fermentación y la calidad del café producido. Escuchar activamente sus necesidades y preocupaciones permite ajustar el diseño del sistema para cumplir con requisitos específicos, garantizando así una implementación efectiva y satisfactoria del proyecto.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abeles, M., Cimoli, M., & Lavarello, P. (2017). Manufactura y cambio estructural. Aportes para pensar la política industrial en la Argentina. In *Desarrollo Económico*.
- Agurto-Sáenz, T., & Gorbeña-Ramos, J. C. (2008). Bacterias Ácido Lácticas: Biopreservante de los Alimentos. *Biotempo*, 8.
- Álvarez-Calatayud, G., Guarner, F., Requena, T., & Marcos, A. (2018). Dieta y microbiota. Impacto en la salud. *Nutr Hosp*, 35(1).
- Antonio Balvatín. (2016). Ciencia de Materiales para Ingeniería. *Universidad de Guanajuato*.
- Arenas, A. F., Hincapie, A. M. V., & Ocampo, G. T. (2022). Effects of post-harvest process on volatile-sensory profile for coffee in Colombia. *Coffee Science*, 17. <https://doi.org/10.25186/v17i.2016>
- ARREOLA, L. (2022). ¿Qué es la fermentación? *Gaceta CCH*.
- Baque Castro, B. I., Marcillo Parrales, K. G., Cedeño Ferrín, J. A., & Gutiérrez García, J. L. (2022). La mecatrónica y su importancia en la sociedad. *Journal TechInnovation*, 1(1). <https://doi.org/10.47230/journal.techinnovation.v1.n1.2022.46-54>
- Blanco Ortega, A., Magadán Salazar, A., Gómez Becerra, F. A., Guzmán Valdivia, C. H., & Antúnez Leyva, E. (2018). Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales. *Pistas Educativas*, 40(January 2019).
- Bolton, W. (2011). MECATRÓNICA SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UN ENFOQUE MULTIDISCIPLINARIO. In *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* (Vol. 44, Issue 8).
- Brockmöller, T., Siqueira, R., Gembarski, P. C., Mozgova, I., & Lachmayer, R. (2020). Computer-aided engineering environment for designing tailored forming components. *Metals*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/met10121589>
- BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, K. J. (2014). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. *Igarss 2014*, 1.
- Carro Suárez, J., Flores Salazar, F., Flores Nava, I., & Hernández Hernández, R. (2019). Industria 4.0 y Manufactura Digital: Un Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa. *Ingeniería*, 24(1). <https://doi.org/10.14483/23448393.13821>
- CCI. (2022). Guía del Café. In *Centro de comercio internacional*.
- Chen, H., Liu, S., Chen, Y., Chen, C., Yang, H., & Chen, Y. (2020). Food safety management systems based on ISO 22000:2018 methodology of hazard analysis compared to ISO 22000:2005. *Accreditation and Quality Assurance*, 25(1). <https://doi.org/10.1007/s00769-019-01409-4>

- Chou, Y. C., Kuo, C. J., Chen, T. T., Horng, G. J., Pai, M. Y., Wu, M. E., Lin, Y. C., Hung, M. H., Su, W. T., Chen, Y. C., Wang, D. C., & Chen, C. C. (2019). Deep-learning-based defective bean inspection with GAN-structured automated labeled data augmentation in coffee industry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(19). <https://doi.org/10.3390/app9194166>
- Colagrossi, A., Pesce, V., Silvestrini, S., Gonzalez-Arjona, D., Hermosin, P., & Battilana, M. (2022). Sensors. In *Modern Spacecraft Guidance, Navigation, and Control: From System Modeling to AI and Innovative Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90916-7.00006-8>
- Comisión del Codex Alimentarius Manual de Procedimiento. (2023). In *Comisión del Codex Alimentarius Manual de Procedimiento*. <https://doi.org/10.4060/cc5042es>
- ConceptoDefinicion. (2020). *¿Qué es Monitoreo? » Su Definición y Significado [2020]*. 2020.
- Cuenta, M., & Compras, C. De. (2019). ¿ Qué es la humedad ? *Climasmoter*.
- da Fonseca, L. M. C. M., Domingues, J. P., Machado, P. B., & Harder, D. (2019). ISO 9001:2015 adoption: A multi-country empirical research. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1). <https://doi.org/10.3926/jiem.2745>
- DANIEL FRANCISCO PARDO GARCÍA. (2018). *EFFECTO DEL TRATAMIENTO TERMOMECAÁNICO EN LA MICROESTRUCTURA DE UN LATÓN C-385. TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO*.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). Sistemas de control. *Sistemas de Control Moderno*, 1.
- Echeverri, D., Buitrago, L., Montes, F., Mejía, I., & González, M. del P. (2005). Café para cardiólogos. *Revista Colombiana de Cardiología*, 11(8).
- El Maidah, N., & Dwi Suhendra, C. (2023). Enhanced Efficiency of Coffee Fruit Ripe Sorting System through Ultrasound-based Optimization and Fuzzy Logic. *JISTECH: Journal of Information Science and Technology*, 12(1). <https://doi.org/10.30862/jistech.v12i1.218>
- Erazo-Arteaga, V. A. (2022). El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina. *Información Tecnológica*, 33(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200297>
- Escobar Guachambala, M. Á., Aquino Arroba, S. M., Pozo Safla, E. R., & Choto Chariguaman, L. S. (2019). Tecnología CAD CAM aplicada al diseño de robots de batalla. *Ciencia Digital*, 3(3.2). <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.2.721>

- Espinosa Gutiérrez, N. G., & Hernández Cruz, H. W. (2021). Gestión da qualidade e BPM em micro e pequenos estabelecimentos produtores de bebidas alcoólicas na Colômbia. *SIGNOS - Investigación En Sistemas de Gestión*, 13(2). <https://doi.org/10.15332/24631140.6662>
- Furqani, I., Arief, R. K., & Muchlisinalahuddin, M. (2022). Analisis Kekuatan Rangka Mesin Perontok Padi Menggunakan Solidworks 2019. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 6(2). <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i2.1201>
- Goodwill Community Foundation Global. (2021). *¿Qué es hardware y software?* Goodwill Community Foundation Global.
- Groover, M. (2018). Fundamentos De Manufactura Moderna 3ra edición. In *Journal of Helminthology* (Vol. 92, Issue 3).
- Guzmán Farfán, L., Castro Sánchez, M., Cruz Alcedo, G., & Arbulú Zuazo, A. (2021). Diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para la fermentación de cacao criollo piurano. *REVISTA DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA PRODUCTIVA*, 1(2). <https://doi.org/10.54353/ritp.v1i2.e002>
- Ignacio-Martínez, M. L., Vázquez-Flores, S. L., & Cruz-Castellanos, D. (2021a). Tipos de materiales. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(15). <https://doi.org/10.29057/estr.v8i15.6395>
- Ignacio-Martínez, M. L., Vázquez-Flores, S. L., & Cruz-Castellanos, D. (2021b). Tipos de materiales. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(15). <https://doi.org/10.29057/estr.v8i15.6395>
- Inveron, V., De la Estrella, M., Lopez, E., Arnelas, I., & Devesa, J. (2012). El fruto. *Reduca (Biología). Serie Botánica*, 5(2).
- Jiménez-Toledo, J. A., Collazos, C., & Revelo-Sánchez, O. (2019). Consideraciones en los procesos de enseñanza-aprendizaje para un primer curso de programación de computadores: una revisión sistemática de la literatura. *TecnoLógicas*, 22. <https://doi.org/10.22430/22565337.1520>
- Juan Castillo. (2019). *Extensión FIQ . UNL – Mundo microscópico I: la levadura*.
 Juan Castillo.
 Formato Documento Electrónico(APA)
- Juárez González, Tiburcio, Maldonado Astudillo, Yanik I., González Mateos, Ricardo, Ramírez Sucre, Manuel Octavio, Álvarez Fitz, Patricia, & Salazar, Ricardo. (2021). Caracterización fisicoquímica y sensorial de café de la montaña de Guerrero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1057-1069. Epub 21 de marzo de 2022. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2773>
- Karangan, J., Sugeng, B., & Sulardi. (2019). Uji KEASAMAN AIR DENGAN ALAT SENSOR pH. *Kaca Puri*, 2(1).
- Leskow, E. (2022). *Temperatura - Concepto, tipos, escalas y medición*. Concepto.

- Llamas, L. (2016). *Medir temperatura y humedad con Arduino y DHT11 o DHT22*. Ingeniería, Informática y Diseño. <https://www.luisllamas.es/arduino-dht11-dht22/>
- Lozada Contreras, J. D., & Bautista España, A. D. (2024). Sistema IoT para el monitoreo de variables ambientales en un ambiente laboral. *Revista Social Fronteriza*, 4(1). [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(1\)117](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)117)
- Manan, M. A., & Webb, C. (2017). Modern microbial solid state fermentation technology for future biorefineries for the production of added-value products. In *Biofuel Research Journal* (Vol. 4, Issue 4). <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.4.5>
- Márquez, M., & Martínez, S. (2011). Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología. *Centro Tecnológico Aragón*.
- Martínez, J. (2019). *Automatización Industrial, ¿qué es y cómo funciona?* Vitc.Com.
- Maxim Integrated. (2015). MAX31865 Datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>.
- Molina Mosquera, J. J., Caviedes Silva, J. P., & Patuso Borda, J. M. (2023). Diseño web con HTML5 para un sistema de monitoreo y control remoto por IoT. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11(1). <https://doi.org/10.17081/invinno.11.1.6587>
- Monroig, M. F. (2016). Morfología Del Cafeto. *Academic.Uprm.Edu*.
- Montoya, A., & Bermudez, M. (2018). MODELAMIENTO DE LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO PARA EL CULTIVO DE MICROORGANISMOS EN UN BIORREACTOR DE COLUMNA DE BURBUJEO. *Social, Contemporary, □□□□ □□□□□(Mm)*.
- Muñoz Ordóñez, C. C., Cobos Lozada, C. A., & Muñoz Ordóñez, J. F. (2023). Predicción del rendimiento de cultivos de café: un mapeo sistemático. *Ingeniería y competitividad*, 25(3).
- Nereida Villa-Uvidia, D. I., Ángel Osorio-Rivera, M. I., & Yolanda Villacis-Venegas III, N. (2020). Extracción, propiedades y beneficios de los mucílagos Extraction, properties and benefits of mucilages Extração, propriedades e benefícios das mucilagens. *Dominio de Las Ciencias*, 6(2).
- Neu, A. K., Pleissner, D., Mehlmann, K., Schneider, R., Puerta-Quintero, G. I., & Venus, J. (2016). Fermentative utilization of coffee mucilage using *Bacillus coagulans* and investigation of down-stream processing of fermentation broth for optically pure l(+)-lactic acid production. *Bioresource Technology*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.122>
- Nivia Vargas, A. M., & Jaramillo Jaramillo, I. (2018). La industria de sensores en Colombia. *Tecnura*, 22(57). <https://doi.org/10.14483/22487638.13518>

- Onthank, K. L., Foster, J., Preston Carman, E., Foster, J. E., Culler-Juarez, M., Calvo, E., Duerksen, W., Natiuk, T., & Saca, L. (2023). The Open acidification Tank Controller: An open-source device for the control of pH and temperature in ocean acidification experiments. *HardwareX*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00435>
- OpenWebinars. (2019). *Qué es C: Características y sintaxis*. Jesus Lucas.
- Ortega Díaz, M., Ríos Rojas, D. S., Gómez Rosales, E., Solano Meza, J. K., & Orjuela Yepes, D. (2022). Materiales compuestos de fibras naturales y polímero reciclados: mezclas, pretratamientos, agentes de acople y propiedades mecánicas. - Una revisión. *Avances Investigación En Ingeniería*, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7579>
- Ortega Ordoñez, R. C., Cobos Recalde, L. F., Segura Núñez, G. P., & Sandoval Sandoval, E. M. (2023). Adquisición de señales analógicas de instrumentación con LOGO! Soft V8.3 mediante generador de señales y el sensor PT100. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5017
- Peñuela-Martínez, A. E., Guerrero, Á., & Sanz-Uribe, J. R. (2022). Cromacafé® Herramienta para identificar los estados de madurez de las variedades de café de fruto rojo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 535. <https://doi.org/10.38141/10779/0535>
- Pereira, R., De Souza, C., Patiño, D., & Lata, J. (2022). Plataforma de enseñanza a distancia de microcontroladores e internet de las cosas. *Ingenius*, 28. <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.05>
- Pérez, I. (2023). Arduino IDE. *Publicación Semestral*, 11(21).
- Perez, S., & Meneses Villagrà, J. Á. (2021). La enseñanza de ciencias por indagación y el diseño ingenieril en educación primaria. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 5(1). <https://doi.org/10.17979/arec.2021.5.1.5807>
- Puerta Quintero, G. I., & Echeverry Molina, J. G. (2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances Técnicos*, 454.
- Quintero, G., Sergio, R., Toirac, G., Laffita, M., Rodríguez, G., Ruiz, L., Silveira, G., & Alberto Ramón Sergio George Quintero, S. (2021). Eficacia, efectividad, eficiencia y equidad en relación con la calidad en los servicios de salud. *Revista de Información Científica Para La Dirección En Salud*, 35.
- Ramos, P. J., Sanz, J. R., & Oliveros, C. E. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*, 61(4).
- Redusers. (2014). Introducción a Proteus. *LabCenter*.
- REYES, D. M. (2022). pH: qué es, cómo se mide y otros datos interesantes. *Revista Universitarios Potosinos*, 266.

- Reyes-Flores, E. (2019). Tipos de Sensores. *Con-Ciencia Serrana Boletín Científico de La Escuela Preparatoria Ixtlahuaco*, 1(2).
- Rivera, O. (2014). Circuitos eléctricos. Magnitudes. *Circuitos Electricos*.
- Riveros, H. (2006). Poscosecha y servicios de apoyo a la comercialización. *GESTIÓN DE AGRONEGOCIOS EN EMPRESAS ASOCIATIVAS RURALES*.
- Roach, N. S., Acosta, D., & Lacher, T. E. (2021). Shade coffee and amphibian conservation, a sustainable way forward? Understanding the perceptions and management strategies of coffee growers in colombia. *Ecology and Society*, 26(2). <https://doi.org/10.5751/ES-12449-260233>
- Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. (2014). Diseño asistido por computador. *Industrial Data*, 9(1). <https://doi.org/10.15381/idata.v9i1.5709>
- Rosales-López, C. (2019). Los bioprocesos en la biotecnología: uso de biorreactores para la producción y el escalamiento de productos de interés comercial. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i9.4626>
- Ruíz, H., Rodríguez, R., Rodríguez, R., Contreras, J., & Aguilar, C. (2017). Diseño De Biorreactores Para Fermentación En Medio Sólido Bio-Reactors Desing for Solid State Fermentation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1).
- Salazar, K., Arroyave, A., Ovalle, A. M., Ocampo López, O. L., Augusto Ramírez, C., & Oliveros, C. E. (2016). Tiempos en la Recolección Manual Tradicional de Café. *Ingeniería Industrial*, 37(2).
- Sanchez, D., Valenzuela, J., & Muriel, J. (2017). *Materiales cerámicos y compuestos*. Instituto Marianao.
- Sánchez Zamora, N., & Lira Hernández, I. A. (2020a). La manufactura aditiva como potenciador de los sistemas productivos. *INVENTUM*, 15(28). <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.104-112>
- Sánchez Zamora, N., & Lira Hernández, I. A. (2020b). La manufactura aditiva como potenciador de los sistemas productivos. *INVENTUM*, 15(28). <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.104-112>
- Sauceda López, E. E., Valenzuela López, R. A., & Báez Hernández, G. E. (2021). Aplicación de ingeniería de métodos para el mejoramiento de operaciones en una empresa manufacturera de equipos de audio. *EID. Ergonomía, Investigación y Desarrollo*, 3(1). <https://doi.org/10.29393/eid3-8aies30008>
- Selena-Mesías, D., Solís-Salas, N., & Peñafiel-Ayala, R. (2022). Análisis de los sistemas anaeróbicos para la purificación lixiviados de rellenos sanitarios y la generación de energía renovable: reactores UASB, sistemas anammox y bioceldas. *Investigación y Desarrollo*, 15(1). <https://doi.org/10.31243/id.v15.2022.1600>

- SOLID BUSINESS INTELLIGENCE S.L. (2021). *SOLIDWORKS. Qué es y para qué sirve*. SolidBI.
- Starbucks. (2020). *C.A.F.E. Practices: Starbucks Approach to Ethically Sourcing Coffee*. Starbucks Stories and News.
- Stelzer, J., & Gonçalves, E. D. N. (2021). Fair trade and comércio justo: Trade justice under different perspectives. *Revista Jurídica*, 1(63). <https://doi.org/10.21902/revistajur.2316-753X.v1i63.5169>
- Torres, E. (2015). Cumplimiento del Decreto 3075 de 1997 y Resolución 2674 de 2013, en las bodegas de producto terminado de Pepsico Alimentos. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Trejo-Téllez, L. I. (2018). VALORACIÓN NUTRICIONAL DE GRANOS DE CAFÉ ROBUSTA (*Coffea canephora*) DE DIFERENTES ORÍGENES PROCESADOS EN MÉXICO. *Agro Productividad*, 11(4). <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i4.264>
- Vanegas Useche, L. V. (2018). Diseño de Elementos de Máquinas. In *Diseño de Elementos de Máquinas*. <https://doi.org/10.22517/9789587223019>
- Velandia Cabra, J. R. (2018). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>
- Wang, J., & Herath, D. (2022). What Makes Robots? Sensors, Actuators, and Algorithms. In *Foundations of Robotics*. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1983-1_7
- Xu, D., Wang, B., Zhang, G., Wang, G., & Yu, Y. (2020). A review of sensorless control methods for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2(1). <https://doi.org/10.23919/tems.2018.8326456>
- Yakin, G., Wibawa, I. M. S., & Putra, I. K. (2021). Rancang Bangun Alat Pengukur pH Tanah Menggunakan Sensor pH Meter Modul V1.1 SEN0161 Berbasis Arduino Uno. *Buletin Fisika*, 22(2).
- Yuski, Moh. N., Hadi, W., & Saleh, A. (2017). Rancang Bangun Jangkar Motor DC. *BERKALA SAINSTEK*, 5(2). <https://doi.org/10.19184/bst.v5i2.5700>
- Zapata Urquijo, C. A., & Muñoz Guevara, J. A. (2022). Introducción a la manufactura de clase mundial. In *Introducción a la manufactura de clase mundial*. <https://doi.org/10.22517/9789587227215>
- Zulkifli, R. S. (2021). Pengaruh Kendali Kecepatan Motor DC Pada Chopper Drive. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer TRIAC*, 8(2). <https://doi.org/10.21107/triac.v8i2.11277>

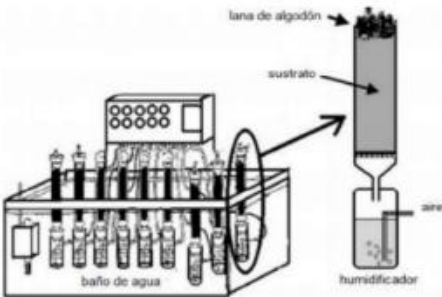
11. ANEXOS

Anexo A. Revisión documental.

N° 1	CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DE FERMENTACIÓN Y SECADO DEL CAFÉ LA PRIMAVERA	
AÑO 2014	FUENTE Applied Microbiology and Biotechnology	AUTORES Juan Pablo Cárdenas Díaz Juan David Pardo Pinzón
RESUMEN	OPORTUNIDADES	DEBILIDADES
<p>El estudio realizado en la finca La Primavera en Colombia se enfocó en mejorar la calidad del café. Se recolectó café maduro y se procesó en la máquina beneficiadora Eco Mill 3000, que tiene un motor de 2 hp, un tornillo sin fin de 3 metros x 4 pulgadas de diámetro y una capacidad de 2.400 kg. Los granos de café se dejaron en la máquina durante 12 horas sin necesidad de manipulación para una fermentación natural.</p> <p>Se utilizó el método ECOMILL-CENICAFÉ para la fermentación, controlando el pH y la temperatura. Descubrieron que las condiciones del suelo causaban un pH neutro inicial, lo que prolongaba la fermentación. El objetivo era alcanzar un pH de 3,5.</p> <p>Además, evaluaron la humedad del grano para cumplir con los estándares de exportación, replicando las condiciones de secado a 45°C durante 19 horas. Aplicaron la norma ISO 6673:2003 para evaluar la humedad, encontrando que el tiempo de secado varía entre 19 horas y 51 minutos y 21 horas y 42 minutos.</p>	<p>Contribución al conocimiento: Este estudio contribuye al conocimiento de algunos factores que afectan la calidad del café.</p> <p>Mejora de los procesos: Al entender mejor los procesos de fermentación y secado, se pueden optimizar estos procesos para mejorar la calidad del café.</p> <p>Cumplimiento de normas: El estudio garantiza que el café cumple con la normatividad necesaria para su comercialización.</p> <p>Eficiencia: La máquina Eco Mill 3000 parece ser eficiente en el manejo del café, lo que podría resultar en un proceso de producción más rápido y menos mano de obra.</p> <p>Calidad del café: Al permitir una fermentación natural y un tiempo de aireación fijo, es posible que se pueda mejorar la calidad del café.</p> <p>Capacidad: Con una capacidad de 2.400 kg, la máquina puede manejar una cantidad significativa de café, lo que podría ser beneficioso para la producción a gran escala.</p>	<p>Condiciones específicas: Los resultados del estudio pueden ser específicos para las condiciones de la finca cafetera La Primavera y pueden no ser aplicables a otras fincas o regiones.</p> <p>Dependencia de factores externos: Los procesos de fermentación y secado pueden verse afectados por factores externos como la temperatura y la humedad, que pueden variar.</p> <p>Dependencia de la máquina: Si la máquina se avería o requiere mantenimiento, podría interrumpir todo el proceso de producción.</p> <p>Limitaciones de la fermentación: Aunque la fermentación natural puede mejorar la calidad del café, también puede ser menos predecible y más difícil de controlar que otros métodos de fermentación.</p> <p>Tiempo fijo de aireación: Aunque un tiempo fijo de aireación puede ser conveniente, puede que no sea óptimo para todos los lotes de café. Algunos lotes pueden requerir más o menos tiempo de aireación dependiendo de varios factores.</p>
<p>LINK https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1159/C%3A%1rdenas%20%3Adaz%2c%20Juan%20Pabid%20-%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y</p>		

Fuente: Propia del autor

Anexo B. Ficha técnica de los biorreactores

FICHA TÉCNICA BIORREACTORES	
<p>Un biorreactor es un aparato con forma de cámara para organismos en crecimiento tales como bacterias o levaduras que se pueden usar para la producción de metabolitos biomoleculares o biopolímeros o para la conversión de desechos orgánicos.</p>	
Nombre	Biorreactor / fermentador
<p style="text-align: center;">Biorreactor de columna</p>  <p>Fuente. (Cano Caiza et al., 2019)</p>	<p>Para rastrear la generación de CO₂ causada por la respiración y los procesos metabólicos del microorganismo, el aparato está acoplado a una columna de cromatografía de gases. Para evitar que el lecho se compacte demasiado, la demanda de oxígeno se satisface mediante aireación forzada utilizando compresores con dispositivos reguladores de presión. Dado que las columnas están construidas de vidrio y tienen cierta forma y disposición, pueden ser una pieza de maquinaria muy económica y al mismo tiempo eliminar eficazmente el calor exotérmico de la fermentación. El equipo es sencillo de adaptar a sistemas más básicos en términos de equipos y cuantificación de productos, lo que lo hace útil para una variedad de aplicaciones. (Ruíz et al., 2017)</p>

Fuente: Propia del autor

Anexo C. Artículo de mecatrónica



Journal **TechInnovation**
Volumen 1, Número 1, 2022
Universidad Estatal del Sur de Manabí
ISSN-e: Pendiente

ARTÍCULO DE REVISIÓN

La mecatrónica y su importancia en la sociedad

Mechatronics and its importance in society

<https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n1.2022.46-54>

Recibido: 01-06-2022 **Aceptado:** 27-06-2022 **Publicado:** 01-07-2022

Bryan Iván Baque Castro^{1*}

<https://orcid.org/0000-0003-1022-0827>

Kleber Germiniano Marcillo PARRALES²

<https://orcid.org/0000-0002-3372-0720>

Julio Alberto Cedeño Ferrín³

<https://orcid.org/0000-0002-6291-2078>

Jimmy Leonardo Gutiérrez García⁴

<https://orcid.org/0000-0003-2166-5856>

1. Estudiante de la Universidad Estatal de Sur de Manabí, carrera Tecnologías de la Información. Jipijapa-Ecuador. baquebryan8634@unesum.edu.ec
2. Ingeniero Eléctrico, Magister, Docente, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador. kleber.marcillo@unesum.edu.ec
3. Ingeniero, Magister, Docente, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador. julio.cedeno@unesum.edu.ec
4. Ingeniero, Magister, Docente de la carrera Tecnologías de la Información. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Manabí - Ecuador. jimmy.gutierrez@unesum.edu.ec

Volumen: 1

Número: 1

Año: 2022

Paginación: 46-54

URL: <https://revistas.unesum.edu.ec/JT/index.php/JT/article/view/5>

***Correspondencia autor:** baque-bryan8634@unesum.edu.ec

Journal - TechInnovation
UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ



Fuente. (Baque Castro et al., 2022)

Anexo D. Tipos de sensores

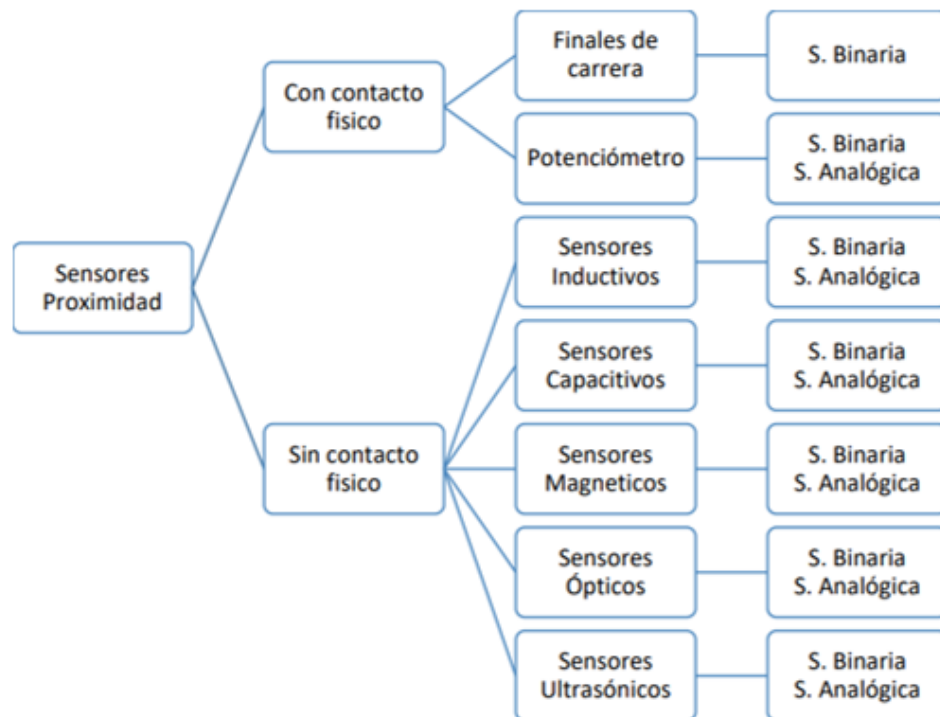
TIPOS DE SENSORES

Colombia es un importante importador de componentes electrónicos, incluidos sensores, que son esenciales en proyectos de ingeniería, como prototipos y circuitos. Estos dispositivos son cruciales en diversas áreas, como la automatización, la industria de sensores, herramientas y la investigación, lo que contribuye al desarrollo empresarial. (Nivia Vargas & Jaramillo, 2018).

El sensor identifica variables fisicoquímicas y las convierte en señales eléctricas, tales como temperatura, distancia, aceleración, fuerza, humedad, Ph, presión y torsión, entre otras. En esencia, es un dispositivo que ajusta la señal que mide para que pueda ser interpretada por otro equipo. (Reyes-Flores, 2019)

En la figura 10 se puede observar los sensores de proximidad divididos en dos categorías: con contacto físico y sin contacto físico. La mayoría de los sensores, ya sean analógicos o binarios, se pueden configurar en ON / OFF.

Figura 10. Tipos de sensores.



Fuente: (Colomer, 2018)

Fuente. Propia del autor

Anexo E. Tipos de Actuadores

TIPOS DE ACTUADORES

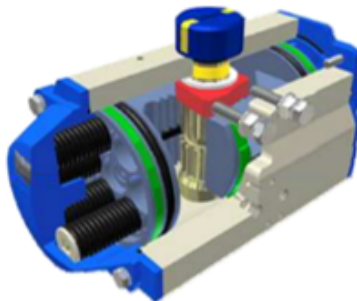
El actuador puede transformar la energía en movimiento o en fuerza. Puede tomar la energía de diferentes fuentes y transformarla en movimiento. Se pueden realizar tres tipos de movimientos lineales, rotacionales y oscilatorios (Corona et al., 2014). Haga clic o pulse aquí para escribir texto. Los actuadores hidráulicos se utilizan cuando se requiere fuerza, mientras que los actuadores neumáticos se utilizan para un fácil posicionamiento. Los hidráulicos necesitan muchos equipos para el suministro de energía y mantenimiento periódico. (Núñez & Páez, 2013)

Según la fuente de energía se puede recomendar el actuador a utilizar para generar el movimiento deseado. Los actuadores que existen son:

- **Actuadores Mecánicos**

Los actuadores mecánicos se utilizan en una variedad de sectores donde se requiere movimiento lineal para elevación, manipulación e instalación. Este dispositivo ofrece los siguientes beneficios: alta confiabilidad, facilidad de uso, costos mínimos de mantenimiento, seguridad y precisión. (Vildósola C, 2010)

Figura 16. Actuador mecánico



Fuente: (Vildósola C, 2010)

Un actuador mecánico ejecuta diversas tareas moviendo un objeto a un área precisa mediante el uso de una polea, una cadena u otros dispositivos. Un movimiento lineal que sube y baja sobre una superficie hacia la que el usuario desea moverse. (Revista especificar, 2018)

- **Actuadores neumáticos.**

Los actuadores neumáticos pueden ser una alternativa preferible por su rendimiento superior y costos de funcionamiento reducidos. No emiten calor y son

Fuente. Propia del autor

Anexo F. Materiales y Datos Importantes



Lista de materiales para Circuito Fermentador de Cafe

Título del diseño	Circuito Fermentador de Cafe
Autor	Alejandro Cardona
Número de documento	1
Revisión	1
Creacion del diseño	miércoles, 11 de septiembre de 2024
Última modificación del diseño	miércoles, 11 de septiembre de 2024
Componentes en el diseño	21

21 Componentes

<u>Cantidad</u>	<u>Referencias</u>	<u>Valor</u>	<u>Coste unitario</u>
1	ARD1	ARDUINO UNO	COP 30.000,00
1	BUZ1	Buzzer	COP 2.000,00
1	C2	100u	COP 400,00
1	D3	Led	COP 300,00
1	HTS1	DHT11	COP 6.000,00
1	J1	Phmetro	COP 50.000,00
1	J2	Motor	COP 10.000,00
2	J3,J7	Rele	COP 7.000,00
1	J4	PT100	COP 12.000,00
1	J5	Compin	COP 6.000,00
1	J6	Bateria	COP 20.000,00
1	L2	27uH	COP 400,00
1	LCD1	LM016L	COP 17.000,00
1	R1	3.9k	COP 200,00
1	R2	1k	COP 200,00
1	R4	10k	COP 200,00
1	R5	430	COP 200,00
1	RV1	1K	COP 2.000,00
1	U1	MAX31865AAP	COP 20.000,00
1	U2	PCF8574	COP 10.000,00
SubTotal:			COP 200.900,00

Total: COP 200.900,00

Monografia - 2024 - Alejandro Cardona

miércoles, 11 de septiembre de 2024 10:49:39 p. m.

Fuente. Propia del autor